

DOI: 10.5846/stxb202303310631

彭建兵, 申艳军, 金钊, 刘铁铭, 李永红, 庄建琦, 王震洪, 余琛, 成玉祥, 马鹏辉, 高帅, 李振洪. 秦岭生态地质环境系统研究关键思考. 生态学报, 2023, 43(11): 4344-4358.

Peng J B, Shen Y J, Jin Z, Liu T M, Li Y H, Zhuang J Q, Wang Z H, Yu C, Cheng Y X, Ma P H, Gao S, Li Z H. Key thoughts on the study of eco-geological environment system in Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4344-4358.

秦岭生态地质环境系统研究关键思考

彭建兵^{1,2,3,4,*}, 申艳军^{1,2,3}, 金钊^{1,3,5}, 刘铁铭⁶, 李永红⁷, 庄建琦^{1,2}, 王震洪^{2,8}, 余琛^{1,2,3}, 成玉祥^{1,2}, 马鹏辉^{1,2}, 高帅⁷, 李振洪^{1,2,3}

1 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054

2 长安大学陕西省黄河科学研究院, 西安 710054

3 黄土科学全国重点实验室(筹), 西安 710054

4 中国地质大学(北京)地质安全研究院, 北京 100083

5 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061

6 西安地质环境监测站, 西安 710018

7 陕西省地质环境监测总站, 西安 710068

8 长安大学水利与环境学院, 西安 710054

摘要:生态地质环境系统研究应以地质学为基础,以生态学为指导,研究岩石、土壤、水、生物等在地质作用下产生的生态问题。秦岭生态地质特色鲜明,是催生生态地质基础理论、形成生态地质保护对策的理想实践地,迫切需要对秦岭生态地质环境角色地位予以系统剖析,梳理秦岭生态地质环境系统面临的主要挑战,构建秦岭生态地质环境系统框架体系。研究提出秦岭生态地质环境系统研究要把握以下关键思考:一是秦岭生态地质环境要素多元、圈层互馈过程复杂、灾害叠加影响效应突出、人-地-生相互作用强烈,立足生态秦岭面临的现实挑战,需认知秦岭生态地质环境系统的要素构成及家底,构建秦岭生态地质环境系统要素互馈演化模型,探索生态退化、水土流失和地质灾害共存递进关系,进而提出地质环境-生态环境-人类环境动态平衡调控对策;二是秦岭生态地质环境系统框架体系应以地质环境认知为基础,将生态环境充分融入地质环境之中整体考虑,并对各要素对生态环境影响进行梳理;其中,构造、地貌地质环境是“生态容器”,岩石、土壤及水文地质环境是“生态载体”,灾害地质环境是引起“生态损害”的重要因素,人类活动环境则为造成“生态扰动”的外在驱动;三是秦岭林地-土体-岩体-山体-水体五体关系复杂,内生互馈作用密切,认识“山水林田湖草生命共同体”同存-同演-同损-同荣规律的科学内涵,应立足于探究林地-土体-岩体-山体-水体的互馈与协同演进机制;四是秦岭地面生态损害、表层水土灾害、浅深层地质灾害呈现互馈耦合、共存递进演化特征,需重点把握“生态损害→地质灾害的递进关系及内在机制”这一关键问题;五是开展秦岭人类环境-地质环境-生态环境动态平衡调控机制研究,应以探索生态安全与人地协调的关系为核心,分析生态系统破坏和地质灾害与地质-地貌-气候-人类活动的时序演变关系,在此基础上探索生态地质环境系统的动态平衡机制,进而提出基于人地协调的生态安全防控策略。

关键词:秦岭;生态地质环境系统;地质环境;生态损害;生态安全

Key thoughts on the study of eco-geological environment system in Qinling Mountains

PENG Jianbing^{1,2,3,4,*}, SHEN Yanjun^{1,2,3}, JIN Zhao^{1,3,5}, LIU Tieming⁶, LI Yonghong⁷, ZHUANG Jianqi^{1,2}, WANG Zhenhong^{2,8}, YU Chen^{1,2,3}, CHENG Yuxiang^{1,2}, MA Penghui^{1,2}, GAO Shuai⁷, LI Zhenhong^{1,2,3}

1 Department of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

基金项目:国家自然科学基金专项项目:秦岭生态地质环境系统演化与灾害风险管控项目(42341101)

收稿日期:2023-03-31; **采用日期:**2023-06-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dicexy_1@chd.edu.cn

2 Academy of Yellow River Sciences of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3 State Key Laboratory of Loess Science(In Preparation), Xi'an 710054, China

4 China University of Geosciences, Institute of Geosafety, Beijing 100083, China

5 Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

6 Xi'an Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710018, China

7 Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710068, China

8 School of Water and Environmental, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: The systematic study of eco-geological environment should be based on geology and under the guidance of ecology to study the ecological problems caused by rock, soil, water, biology and so on. Qinling Mountains has distinctive eco-geological characteristics, which is an ideal practical place to give birth to the basic theory of eco-geology and form eco-geological protection countermeasures. It is urgent to systematically analyze the role and status of Qinling eco-geological environment, sort out the main challenges faced by Qinling eco-geological environment system, and construct the framework system of Qinling eco-geological environment system. This paper puts forward that the following key thoughts should be grasped in the study of Qinling eco-geological environment system. Firstly, the multi-elements of Qinling eco-geological environment, the complex process of circle-layer mutual feedback, the prominent effect of disaster superposition, and the strong human-geology-ecology interaction. Based on the realistic challenges faced by the ecological Qinling Mountains, it is necessary to recognize the element composition and resource status of the Qinling eco-geological environment system, and construct a mutual feedback evolution model of the elements of the Qinling eco-geological environment system, reexplores the coexistence and progressive relationship among ecological degradation, soil erosion and geological disasters, and then puts forward the countermeasures for the dynamic balance of geological environment-ecological environment-human environment. Secondly, the frame system of Qinling eco-geological environment system should be based on the cognition of geological environment, fully integrate the ecological environment into the geological environment as a whole, and sort out the impact of various elements on the ecological environment. Among them, the tectonic, geomorphological geological environment is the "ecological container", the rock, soil and hydro geological environment are the "ecological carrier", and the disaster geological environment is the important factor causing "ecological damage". The environment of human activities is the external drive of "ecological disturbance". Thirdly, the relationship among forest body, soil body, rock mass, mountain body and water body in Qinling Mountains is complex, and the endogenetic interaction is close. To understand the scientific connotation of the law of co-exist, co-evolution, co-loss and co-prosperity of "Life Community of mountains, waters, forests, farmlands, lakes and grasslands", we should be based on exploring the mutual feedback and co-evolution mechanism of forest-soil-rock-mountain-water. Fourthly, the surface ecological damage, surface soil and water disasters, and shallow and deep geological disasters in the Qinling Mountains show the characteristics of mutual feedback-coupling, coexistence and progressive evolution. It is necessary to pay attention to the key problem of "the progressive relationship between ecological damage and geological disasters and the internal mechanism". Lastly, research on the regulation mechanism of the dynamic balance of human environment-geological environment-ecological environment in the Qinling Mountains should focus on exploring the relationship between ecological security and human-land coordination, and analyze the relationship between the destruction of ecosystem and geological disasters and the sequential evolution of geology-geomorphology-climate-human activities. On this basis, the dynamic balance mechanism of eco-geological environment system is explored, and then the ecological security prevention and control strategy based on human-land coordination is put forward.

Key Words: Qinling Mountains; eco-geological environment system; geological environment; ecological damage; ecological security

目前,我国生态环境保护工作如火如荼,表现在:(1)污染治理力度空前,生态环境质量改善提速;发布实施大气、水、土壤污染防治三大行动计划,污染治理力度之大前所未有;生态环境基础设施建设加速推进,成为全世界污水处理、垃圾处理能力最大的国家;过去 10 年天更蓝、山更绿、水更清了^[1]。(2)制度体系不断完善,生态治理能力明显提升;开展中央环境保护督察,实现 31 个省区市全覆盖,推动解决了一大批突出环境问题;有序推进环保机构监测监察执法垂直管理制度改革,开展生态环境损害赔偿制度改革试点;完成环境保护法、大气污染防治法、水污染防治法等制(修)订,为生态文明建设提供了科学规范和可靠保障^[2]。(3)在发展中保护、在保护中发展,以生态文明建设促进高质量发展;将资源节约和生态环境保护全面融入国家建设之中,能源消费结构发生积极变化,中国成为世界利用新能源、可再生能源第一大国。近年,党和国家在推进长江经济带发展、黄河流域生态保护和高质量发展、乡村振兴等重大战略过程中,均将“生态文明”列为重要建设工作^[3-5]。

推进生态环境保护必须坚持正确的生态发展观,采用科学化方法解决生态环境问题。然而,现阶段生态环境保护仍面临着一些基础性科学问题尚未破解,严重制约我国生态文明建设的高质量发展。具体体现在:(1)制约生态环境系统变化的本底因素是什么?生态环境系统是指生物及其生存繁衍的自然因素及条件总和,包含大气圈、水圈、生物圈、土壤圈和岩石圈等地球近地表圈层各要素^[6]。因生态环境系统的多圈层特征,理解地球表层各要素现状、演变过程和相互作用是实现生态环境系统调控和可持续发展的重要前提^[7]。因此,必须立足于“地球关键带”系统科学理论,从地质环境角度认识生态环境系统变化^[8-9]。而实现上述目标的核心在于厘清地质环境与生态环境的关系,探索地质环境是如何构建并维持生态环境系统功能的?揭示地质环境演化是如何影响与制约生态环境变化的?(2)制约“山水林田湖草生命共同体”演化的主控因素是什么?地球浅表层常见生态地质体可概括为:林体、土体、岩体、山体、水体(简称:“五体”),“五体”相互作用构成了生态地质环境的主体;而山、水、林、田、湖、草等生态要素依托诸上生态地质体而形成生命共同体,并呈现同存-同演-同损-同荣(简称:“四同”)演化规律;因此,科学认识山水林田湖草生命共同体“四同”规律,必须立足于地球浅表层生态地质体的内在关系,核心回答生命共同体“四同”与生态地质环境“五体”的关系;探索生态地质环境“五体”是如何互馈与协同演进的?揭示“五体”是如何制约与影响生命共同体“四同”演化的?(3)制约生态退化和损害的主控因素是什么?生态退化和损害导致生态系统脆弱,生态失衡风险增加;诸多生态问题虽外在表现为水、土、气、生等生态要素问题,但根在地质;因地质环境的变动与恶化,导致表层生态要素韧性能力降低而产生损害^[10-12]，“皮之不存，毛将焉附?”。同时,生态损害现象的持续出现会导致地质环境承载能力弱化,诱发水土灾害、地质灾害问题^[13-15]。因此,破解生态退化与损害问题,必须立足于生态-地质系统失衡角度,核心回答生态损害与水土灾害、地质灾害的关系,探索生态损害、水土灾害与地质灾害的共存递进机制,进而揭示地质环境变化是如何制约与影响生态环境的?(4)制约生态安全的主控因素什么?生态安全是指人类在生产、生活和健康等方面不受生态破坏与环境污染等影响的保障程度。构建生态安全保障体系,应以保障人类在生产、生活和健康等不受生态变化影响为目标,以人类所要求的生态因子质量进行衡量。而人类活动环境是典型的天-地-生-人互馈系统,与所处的地质环境、生态环境关系密切。营造良好的人类活动环境,必须追求人类环境与地质环境、生态环境的动态化平衡,核心在于厘清生态安全与人地协调的关系;并探索如何揭示人类环境-地质环境-生态环境的动态平衡机制?如何构建基于人地协调的人类环境-地质环境-生态环境的防控保护对策?上述基础性科学问题的解答有赖于构建生态地质环境系统研究体系,探索在国家生态文明建设的大背景下,如何科学认识生态环境系统、地质环境系统与人类环境系统三者相互耦合、共同作用关系?据此,笔者团队^[16]2022年初步提出了“生态地质环境系统”的概念,并建议生态地质环境系统研究,应以认知与改善地质环境的生态载体功能为基础,以提升生态环境的韧性与协调性为出发点,以实现营造良好的人类活动环境为目标,采用地质学、生态学、灾害学等多学科交叉融合方法,揭示岩石、土壤、水、生物等生态要素在地质作用下产生的生态问题及效应。

“秦岭和合南北、泽被天下,是我国重要的生态安全屏障,是天然空调,是黄河、长江流域的重要水源涵养

地,是我国的“中央水塔”,是南北分界线,是生物基因库,也是中华民族的祖脉、中华文化的重要象征。保护好秦岭生态环境,对确保中华民族长盛不衰、实现“两个一百年”奋斗目标、实现可持续发展具有十分重大而深远的意义”。习近平总书记来陕考察时这一重要讲话,从地理位置、生态作用、水资源保障、历史传承、文化渊源给予了秦岭高度评价和充分肯定。因此,保护好秦岭生态环境,关系到中华民族的伟大复兴和永续发展。国家自然科学基金委员会交叉融合板块 2022 年决定设立专项项目,针对秦岭生态屏障建设中的重大基础科学问题开展研究,设置了《秦岭生态系统动态演化与绿色发展机制》专项项目,笔者团队承担了专项中的课题一《秦岭生态地质环境系统演化与灾害风险管控》的研究工作,本文即是该课题的主要研究构想。

秦岭生态功能突出,生态地质特色鲜明,生态地质要素多元,浅表圈层互馈复杂,灾害叠加效应突出,人-地-生作用强烈,是催生生态地质基础理论、形成生态保护理论理想的理想基地。依托秦岭这一天然基地,构建秦岭生态地质环境系统研究框架体系,并着重探索四大关系:①生态环境与地质环境关系;②生态演化与地质演化的关系;③生态损害与地质灾害的关系;④生态安全与人地协调关系;可实现上述问题的顺利破解,以期健全生态地质学学科体系,为国家生态文明重大战略高质量实施提供理论支撑。

1 秦岭的生态地质环境角色地位及面临挑战

秦岭雄踞中国地理版图中央,与欧洲阿尔卑斯山脉、北美落基山脉并称为世界“三大中央山脉”,它是我国南北地理分界线、重要的生态安全屏障,发挥着水源涵养、调节气候、维持生物多样性等诸多生态功能,在我国自然地理格局中占有重要地位^[17]。广义的秦岭西起甘肃省临潭县北部的白石山,东到河南伏牛山,北为秦岭北麓坡脚线,南至汉江区域,东西绵延约 1600 km、南北宽约 200—300 km^[18-19],面积约 40 万 km²;秦岭以嘉陵江上游西汉水为界,又可分为东秦岭、西秦岭^[20]。狭义的秦岭主要指陕西境内的秦岭部分,其东西延展约 400—500 km,南北宽约 100—150 km,平均海拔 1500—2500 m,包含陕西中南部地区,总面积约 8 万 km²。

1.1 特别的秦岭——功能与角色地位

秦岭是一部厚重的书,在我国生态地质安全格局中占据极为重要地位,关系着中华民族的伟大复兴和永续发展。具体体现在:①秦岭造山带是经历长期、多次不同造山运动作用而形成的复合型大陆造山带,是中国大陆的两个主要块体(华北板块、华南板块)的板块拼合带,因该拼合带形成中国大陆整体骨架,在我国大陆的形成与演化中占有重要地位,是中国大陆乃至东亚大陆的重要标志地质边界^[21-22]。②秦岭是我国重要的南北地理分界线;以秦岭-淮河一线为界,我国南、北方的自然条件、农业生产方式、地理风貌及生活习俗均呈现明显的差异性变化,从古至今,我国进行南、北方划分,均以该界线作为重要的参考标志,具有“一山分南北”的美誉。③秦岭是我国重要的南北气候分区带;其为我国暖温带和亚热带的分界线(气候带)、800 mm 年等降水量线(降水)、湿润地区与半湿润区的分界线(干湿状况)、亚热带常绿阔叶林与温带落叶阔叶林的分界线(植物)以及旱地农业与水田农业分界线(农业)等。④秦岭是我国重要的中央生态屏障带;东西绵延约 1600 km 的秦岭,是一道巨大的生态安全屏障,有着“国家中央公园”之称。其构成了一道巨大的中央生态安全屏障,长期保护着中南、西北生态安全,动态调节着长江流域生态变化,并深刻影响着黄河流域生态环境。⑤秦岭被誉为“中央水塔”;不仅调控着南北方的降水,而且蕴藏极为丰富的淡水资源,其储量多达 220 多亿 m³,是“两江四水四库”水源地;同时,是我国南、北方最重要的两大水系——长江、黄河流域的重要水源涵养地,也是我国南水北调的重要水源地,每年向北京、天津等地供水 100 多亿 m³。⑥秦岭是我国重要的中央物种基因库,是我国众多孑遗和珍稀动植物的理想栖息地,据调查统计,区内种子植物可达 3436 种,拥有我国特有植物的比例高达 50.6%^[23];拥有全国鸟类的 34%、兽类的 29%;此外,境内已有 35 个自然保护区,其中国家级 21 个,省级 14 个^[24]。形成了南北植物种类交汇融合的奇特景观,素有“世界物种基因库”的美誉。⑦秦岭是我国森林碳汇的中央汇聚地和植物释氧的核心供给区,2015 年秦岭区域森林碳汇总量约 6.78 GtC,占全国总量的 7.04%,氧气产生量 10630 亿 t,占全国总量的 8.66%^[25],对保障我国“双碳战略”目标的顺利实现具有重要支撑作用^[26]。⑧秦岭横亘中国版图中央,三千里大秦岭,茫茫苍苍,提携着黄河、长江,统领了北方、南

方,作为华夏文明发祥的重要文化源地和历史文化基因源地,影响了我国数千年的文明进程,被尊为“中华父亲山”“中华祖脉”。整体而言,秦岭撑起了中国大陆骨架的主体脊梁,造就了我国南北方地质地理、气候环境、经济文化的不同特点,是国家生态保护的中央平衡器、国家水源给养的中央调节器及国家经济发展的中央牵引器,保护好秦岭生态环境,对确保中华民族长盛不衰、实现“两个一百年”奋斗目标、实现可持续发展具有重大而深远的意义(图1)。

1.2 秦岭生态地质环境面临的主要挑战

1.2.1 秦岭生态地质环境要素多元

秦岭因复杂且长期的地质地貌演化过程,造就了多元的地质-地理-生态要素单元,并构成了完备的秦岭生态地质环境系统。据现阶段已有资料显示:①秦岭北坡汾渭断陷抬升,山岭自西向东排列整齐,崖陡壁峭,壁立山峰,岭脊海拔约 2000 m,如:华山主峰海拔为 2400 m,太白山主峰为 3771 m;秦岭北坡山麓短急,地形陡峭,多峡谷,南坡山麓缓长,坡势较缓,丛山间多形成平缓盆地。②秦岭是长江与黄河两大水系分水岭,秦岭范围内流域面积在 100 km²以上的河流有 195 条,年降水量约 820 mm,多年平均水资源总量达 192.5 亿 m³[27-28]。③秦岭地处中纬度季风区,北坡为暖温带半湿润季风气候,暖温带落叶阔叶林广泛分布。南坡为北亚热带季风性湿润气候,北亚热带落叶、常绿阔叶林混交分布。秦岭范围有种子植物 3800 余种、鸟类 418 种、兽类 112 种,分别占全国总数的 13%、29%、22.4%,120 种动物和 176 种植物被列入国家和省级重点保护对象,大熊猫、金丝猴、羚牛、朱鹮被并称“秦岭四宝”[29]。④秦岭森林密布,林业用地面积约占总面积的 80.4%,森林覆盖率达到 82%(截止 2022 年数据)[29]。⑤秦岭有 30 种矿产资源保有储量列全国前十位,钼、镍、钒、重晶石、石灰石等蕴藏丰富。秦岭拥有丹参、杜仲、绞股蓝等中药材 600 余种,是我国重要的“天然药库”[23]。然而,目前针对秦岭的生态地质环境要素认知仍不全面、不具体;因此,如何采用科学、合理的生态地质环境构成及要素划分理论方法,如何采取有效、多元的调查技术手段,全面认知秦岭的庞杂生态地质环境要素构成,掌握秦岭生态地质环境资源家底,形成秦岭生态地质环境本底数据库,成为现阶段秦岭生态地质环境研究面临的挑战之一。

1.2.2 秦岭浅表圈层互馈过程复杂

秦岭浅表多圈层相互影响、内外动力耦合显著,是构造-气候-地表过程-人类活动互馈作用最为强烈的区域之一。秦岭属于我国典型的中央造山带,是中国大陆中央造山系的中心组成部分,在中国大陆和东亚具有重要的地表-深部联系地球动力学意义[30]。现今的秦岭造山带经历了三大构造演化阶段,进而构成了三大套基本构造地层岩石单元;同时,多次的构造运动和变质作用,在秦岭形成了复杂的地形、地貌以及软弱变质岩系,尤其是构造断层“地垒”部分,地形垂直上升形成山地,使秦岭北麓山势陡峭,山体稳定性差,在相当大程度上控制着地表生态系统的稳定性。此外,秦岭造山带也是中国大陆地表系统与深部过程及动力互馈的信息库、资源能源汇集区和控制带。相关学者已开始关注地球浅表圈层互馈作用过程研究,并探究多圈层的地质-地貌-生态互馈关系;如张国伟院士团队研究[31]认为:秦岭造山带为地球系统多圈层相互作用极为活跃的场所以之一,是中国大陆多圈层相互作用的重要舞台;其中,秦岭造山作用期间,多圈层相互作用以固体地球圈层的关联互动为主,而在造山作用结束后,以地表作用上升为主要形式。依托秦岭开展多圈层关联互动与中国大陆宜居环境研究、构建构造-环境-生命-人文的地球系统科学研究链,具有的“广阔的天地”;董云鹏等[32]基



图1 秦岭的重要功能及角色地位

Fig.1 The Important Functions and Role of Qinling Mountains

于深部地质过程-浅表构造地貌-气候环境变迁-生物多样性协同演化的科学理念,研究了秦岭新生代隆升过程的深部动力学与浅表构造地貌的耦合过程,探讨秦岭山脉隆升引起的大气环流、季风、降水等气候和环境的变化,该研究为理解地球浅表圈层互馈协同演化关系等提供了新视角。综上所述,秦岭浅表圈层互馈过程复杂,秦岭地质环境各子系统如何决定和影响秦岭生态环境系统的构成与动态演化仍处于初步探索阶段,因此,亟待依托秦岭这一天然的生态地质环境试验场,立足地球关键带理论科学前沿,认知地表岩石圈-土壤圈-生物圈-水圈-大气圈相互作用及互馈效应,构建秦岭生态地质环境系统圈层互馈演化模型,定量描述地表关键带系列过程及物质循环,进而揭示地球浅表层生态系统演化过程及机制。

1.2.3 秦岭灾害叠加影响效应突出

秦岭地质背景复杂、地貌类型多样、地形高差大、暴雨频繁、土壤抗蚀性差,导致崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害频繁发生,严重损毁各类生态系统结构,给当地人民的生命财产造成巨大威胁。已有调查表明,秦岭山区地质灾害主要发生在年平均降水量小于 1000 mm、倾角范围在 20°—40° 范围内的低山区,且灾害沿主要河流、断裂、交通干道两侧一定范围内呈“带状”分布特征^[33]。然而,秦岭地区经济发展相对落后,生态保护和修复资金投入不足,致使治理工程建设标准低、规模小、综合配套差,水灾损毁近 40%。据统计,近 10 年秦岭北麓平均每年发生山洪灾害 6 次以上,导致大量的山地浅层滑坡和泥沙输出,毁损生态系统结构,增加山洪灾害风险,致使山地生境破碎严重、土层裸露、水土流失加剧。近 50 年来,秦岭降雨变化特征是小雨减少、暴雨增多。夏季暴雨量比 50 年前已增加了 50% 以上,频次和强度均增大,加之人类活动的破坏,水土灾害发生风险高。据陕西省水利年鉴统计数据^[34],秦岭北麓陕西段水土流失面积达 4.15 万 km², 占总面积的 52%, 且有扩大趋势;年水土流失量达 0.84 亿吨,浅山区土壤侵蚀模数超过 2500 t km⁻² a⁻¹。此外,不合理采矿活动破坏地表生态环境,导致地质灾害异常严重。如:2015 年 8 月 12 日,山阳县由于矿山开采导致特大型山体滑坡,造成 65 人死亡,直接经济损失达 5 亿元^[35]。综上,秦岭浅表层生态损害、浅层水土灾害、中深层地质灾害,三者叠加影响效应突出,对秦岭地区的水源涵养、水土保持、植被生养等生态系统功能造成直接破坏。现阶段有关秦岭生态地质环境系统灾变递进演化机制与风险防控研究尚属空白,深入探索植被系统、土壤系统、水文系统和浅层风化岩石之间的耦合互馈,探究其对生态退化、水土流失和地质灾害控制机制,是生态、水文和地质灾害学科交叉的薄弱环节,也是目前生态地质学领域研究的前沿方向。

1.2.4 秦岭人-地-生相互作用强烈

秦岭自古以来是人地互馈最为突出、最为典型、最为复杂区域之一。域内分布有 20 多处中华民族祖先遗址遗迹,周边孕育众多历史名城和人类聚集地,形成了中华文明源脉区,也是中华民族的重要发祥地和华夏文明摇篮^[36]。目前,围绕秦岭重大交通工程建设包括:宝成铁路、西康高速、西康铁路、西汉高速、西成高铁、西十高铁等,并建成了长达 18.46 km 的秦岭铁路隧道、长达 18.02 km 的秦岭终南山公路隧道等^[37];此外,南水北调、引汉济渭、黑河引水工程等穿越秦岭腹地,成为我国重大水利空间调配的重要枢纽地。人类活动在改造、利用秦岭同时,也对秦岭生态地质环境造成了诸多破坏。据调查显示,近 40 年来,人地互馈作用明显增强,导致秦岭生态环境承载能力及抗扰动水平降低,这与不同地区洪水灾害、耕地开垦、滥砍滥发、城市扩张等因素密切相关^[38]。围绕秦岭人类活动对生态地质环境的破坏问题,国家高度重视并加强专项生态保护与修复。如:2014 年 5 月—2018 年 7 月,习近平总书记先后 6 次就“秦岭北麓违建别墅破坏环境”事件作出批示指示,引起社会各界广泛关注;强烈的人地互馈作用造就了秦岭生态地质环境与人类社会相互作用、相互影响的复杂作用过程;秦岭生态地质环境为人类提供了赖以生存的基本物质基础,同时,秦岭生态地质环境失衡受损产生的各类灾害,同样会对人类生产与生活造成严重损失。因此,围绕秦岭人地互馈作用强烈,人-地-生平衡关系不明等问题,探索地质环境-生态环境-人类环境之间的动态平衡关系,并提出科学、合理的生态安全调控对策,是秦岭生态地质环境系统研究的重要内容之一。

2 秦岭生态地质环境研究的关键思考

生态地质学以解决人类活动环境与所处的生态环境及地质环境之间的相互作用关系为目标,其核心任务

是梳理生态-地质-人类活动的相互作用关系,构建生态地质环境系统研究体系。同时,依据该框架体系,探究地球浅表层生态地质环境系统要素的变化规律及互馈机制,并关注因生态地质环境失衡引起的灾害共存递进演化关系,进而建立生态地质环境系统协调平衡理论与安全防控对策。这里提出秦岭生态地质环境研究四个关键思考即四个关键问题,其中,秦岭生态地质环境系统及要素构成是基础框架,主要探究系统框架体系问题;秦岭林地-土体-岩体-山体-水体(简称“五体”)互馈与协同演进机制、生态损害-水土灾害-地质灾害(简称“三害”)共存递进演化关系,是两大基础性问题;而秦岭人类环境-地质环境-生态环境(简称“三环”)动态平衡调控机制研究,是实现“三环”动态平衡与科学调控的最终目标;上述问题的内在关联如图 2 所示。

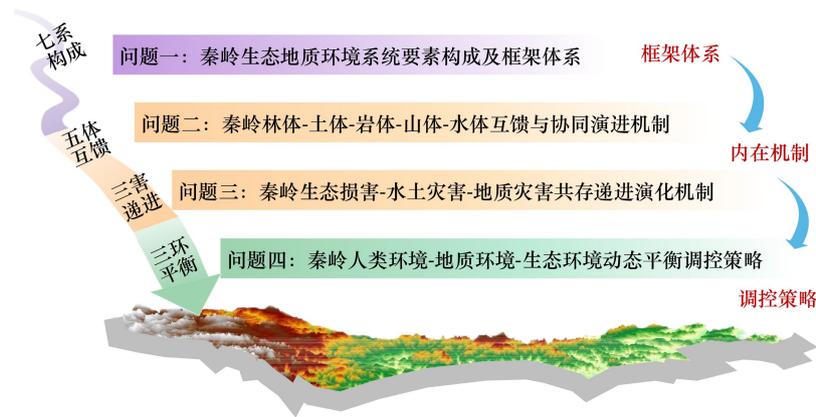


图 2 秦岭生态地质环境研究的四大关键科学问题

Fig.2 Four key scientific issues in the study of ecological geological environment in Qinling Mountains

2.1 秦岭生态地质环境系统要素构成及框架体系

秦岭的生态问题表象在水、土、气、生,根在地质。地质环境是生态环境的基础,对生态环境起着一定的控制作用,同时,生态环境与地质环境又是耦合有机的整体,关注秦岭生态环境问题应以地质环境认知为基础,将生态环境充分融入入地质环境之中,将二者予以整体考虑,形成秦岭生态地质环境系统化研究体系。该体系不仅应包括秦岭生态环境、地质环境的全部要素,尚应包括两者相互作用所产生的系统失衡要素,以及因人类活动而产生的一系列外在扰动要素。

生态地质环境系统是由生态环境与地质环境相互关联形成的相对统一的整体^[39]。通过秦岭生态-地质-人类活动关系认识可知:地质环境与生态环境关系密切,地质环境系统影响、制约着生态环境系统;而人类活动则同时深刻影响着生态环境与地质环境,是造成秦岭生态地质环境系统变化的最大外驱力。秦岭生态地质环境系统包括七大子要素,具体而言,①构造、地貌地质环境是“生态容器”;构造地质环境包括区域构造、断裂构造、褶皱构造、变质构造及小构造等,其决定了山体、坡体的稳定性,同时控制了生态系统的分区、分带,造成生态系统的区域分异性特征;地貌地质环境包括地貌类型、地貌特征、海拔、坡度、坡向等,其通过影响气温、降水等气候特征,决定了植被群落类型与空间分布,造成植被的水平与垂直分带性;而构造地质环境与地貌地质环境相互制约、相互影响,为生态系统的孕育与演化提供了场所。②岩石、土壤及水文地质环境是“生态载体”;成土、基岩是控制植被种属与空间分布的最重要因素,水文是维持植被群落与生态系统健康功能的基础要素;岩石地质环境包括地层岩性、结构面(体)、破碎风化带及作用、物理力学性质、岩石地球化学等,其决定了生态系统区域分布与水平分带,并制约影响坡体稳定与植被生态自持性;土壤地质环境包括土壤成分、结构、厚度、持水性、通气性及土壤地球化学等,其决定了生物类型与适应性,为生态系统自循环体系提供了基础养分;而水文地质环境包括降雨量、地下水、地表水、流量、流向、水源涵养能力及水文地球化学等,其深刻影响着生态系统分区、分带,并往往是引起生态系统失衡的重要诱因;总体而言,岩石、土壤及水文地质环境共同作用,为生态系统的适应与稳定提供了基础物质与能量供给。③灾害地质环境是引起“生态损害”的重要因素;

其包括崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝、地面塌陷(沉陷)、水土流失等,灾害的发生往往破坏了生态系统结构与功能,引起生态系统破坏,导致生态脆弱区的出现。灾害地质环境系构造、地貌、岩石、土壤及水文等地质环境失衡的外在表现,是引起生态系统劣化与韧性降低的最重要原因之一。④人类活动环境是造成“生态扰动”的最主要因素;人类在依赖生态地质环境而生存和发展同时,又不断地改变着生态地质环境。人类营力对生态地质环境系统的改造作用在一定程度上超过了自然营力^[40]。常见的人类活动包括:开挖、填埋、建筑、耕植、砍伐及污染等,上述人类活动对生态环境、地质环境均存在直接或间接影响;因此,开展生态地质环境系统体系构建必须关注人类活动环境的扰动因素,明晰人类活动环境对生态地质环境的影响作用。秦岭生态地质环境系统要素构成及相互关系框架体系见图 3。

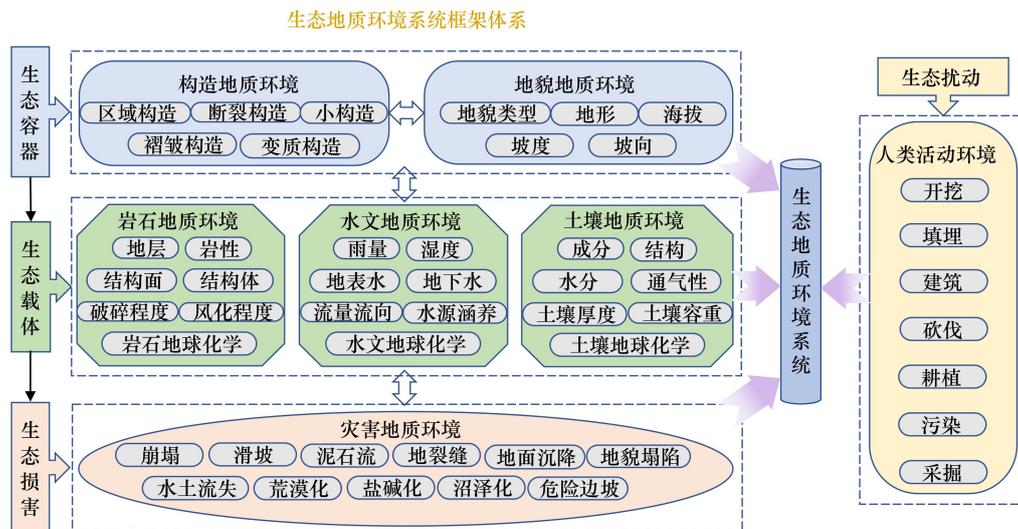


图 3 秦岭生态地质环境系统要素构成及相互关系框架体系

Fig.3 The composition and interrelation framework system of the ecological geological environment system in Qinling Mountains

秦岭生态地质环境系统是一个集生态环境、地质环境和人类活动扰动影响等为一体的复杂系统,系统要素种类繁多、内在关联密切。其中,地质环境是生态环境的“容器”与“载体”,为生态环境提供了空间、能量与物质养分,其影响与制约着生态环境承载能力与生态系统服务;多圈层相互作用下的构造、地貌、岩石、土壤、水文等地质环境要素,决定了生态环境系统的空间分区与分带,并控制着生态环境系统的稳定性与健康性。秦岭生态地质环境系统理论框架应以“地质的生态控制论”为基础,明晰秦岭各地质环境要素对生态环境影响、制约能力;并以认识灾害地质环境对生态损害的过程与机制为重点,评价秦岭生态环境系统的损害边界与韧性能力;同时,以营造良好的人类活动环境为目标,通过评价人类活动环境对生态系统的正负反馈效应,形成“三环”动态平衡与科学调控方法体系。秦岭地质环境、人类活动环境制约及影响生态环境的方式与路径见图 4 所示。

据此,围绕“秦岭生态地质环境系统要素构成及框架体系构建”这一关键问题,亟待解决:①秦岭生态地质环境系统各要素构成具有哪些本底特征? ②秦岭地质环境是如何制约与影响生态环境的? 如何表征? ③秦岭人类活动环境类型及强度如何认知? 其对生态系统的正负反馈效应如何评价? 通过依托秦岭开展生态地质环境研究,构建生态地质环境系统框架体系,可为认知地质环境系统如何制约生态环境系统提供理论解析。

2.2 秦岭林体-土体-岩体-山体-水体的互馈与协同演进机制

秦岭作为中央造山带地质构造的枢纽地带^[21],地貌上由一系列平行的山脉及山间串珠式谷地、湖盆构成,峰峦雄伟耸立、水系河流密集、地层岩性复杂、土壤养分肥沃、生物资源丰富,林体、土体、岩体、山体、水体

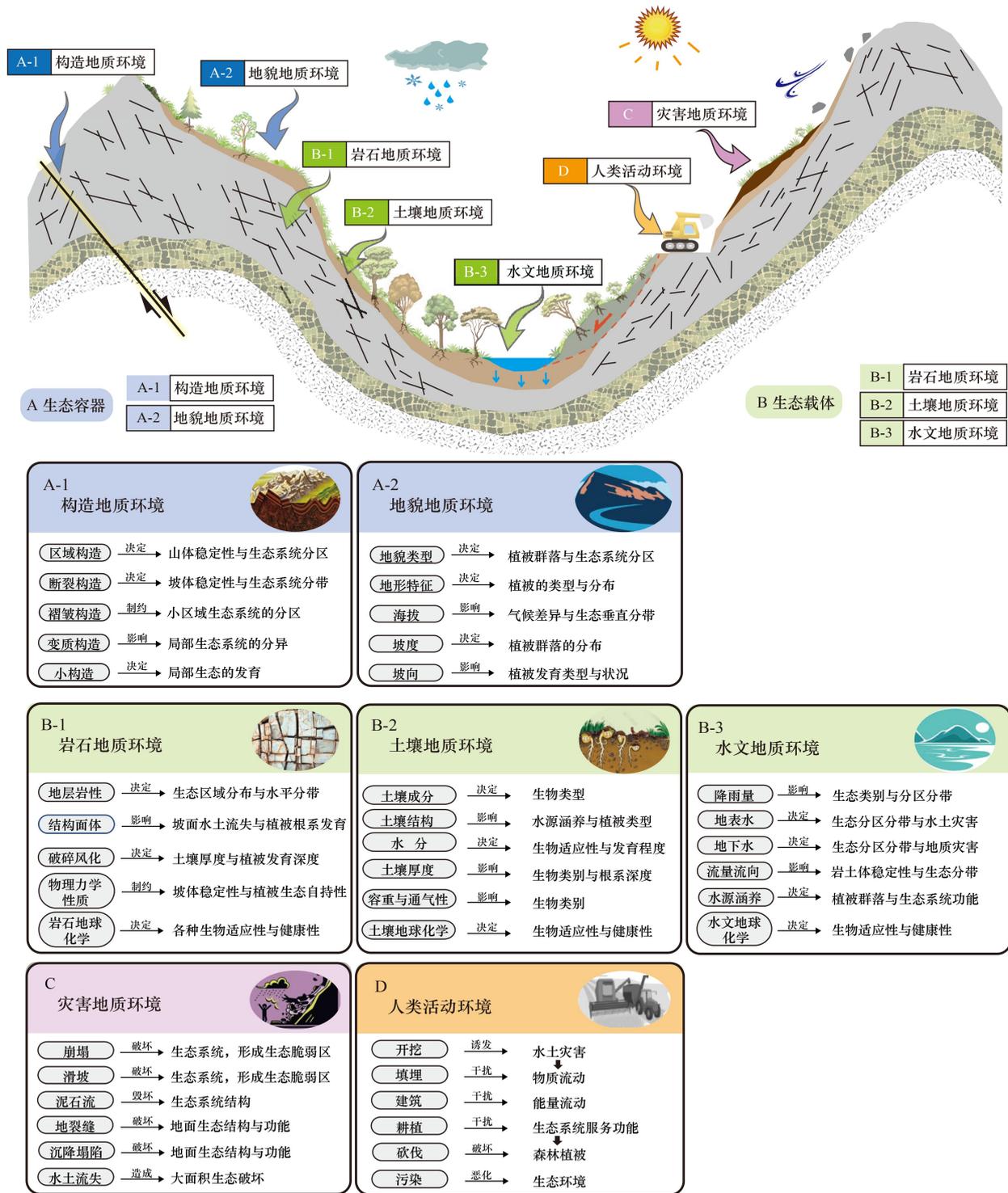


图 4 秦岭地质环境与人类活动环境制约与影响生态环境的方式与路径

Fig.4 The path of Qinling geological environment and human activity restricting and affecting the ecological environment

等五体天然有机组合,同时,五体关系复杂、内生互馈作用密切。

生态地质环境系统是由林体、土体、岩体、山体、水体等有机组合构成的生态环境地质体。若将该系统类比为人体结构组成系统,山体、岩体、土体、林体分别构成系统的骨、肉、皮、毛,而水体则充当了类似于人体血液的角色^[16]。而五体之间相互影响与协同演化,形成了生态地质环境系统的核心内生关系。具体而言,林体

对土、岩体起到稳定与防护作用;土、水体为林体植被生长提供养分滋养作用;岩体对林、土、水体发挥骨架支撑作用;而山体则承载着林、土、岩、水体,并发挥着系统内地质地貌与生态演化的基石作用。习近平总书记从生态文明建设角度提出了“山水林田湖草生命共同体”的科学论断,强调“人的命脉在田、田的命脉在水、水的命脉在山、山的命脉在土、土的命脉在树”“对山水林田湖草进行统一保护、修复是十分必要的”,为推进生态文明和“美丽中国”建设提供了行动指南。笔者认为:“山水林田湖草生命共同体”体现的是山、水、林、田、湖、草等生态要素的同存-同演-同损-同荣作用规律,而山、水、林、田、湖、草等生态要素依托生态地质环境系统而形成生命共同体;因此,认识“山水林田湖草生命共同体”同存-同演-同损-同荣规律的科学内涵,应立足于生态地质环境系统要素的内在关系予以系统考虑,探究林体-土体-岩体-山体-水体的互馈与协同演进机制(图5)。其中,五体既有不同的相互依存模式,又存在复杂的相互作用关系;而且生态地质环境系统中五体状态条件以及错综复杂的相互作用关系,决定了生态地质环境的破坏模式。

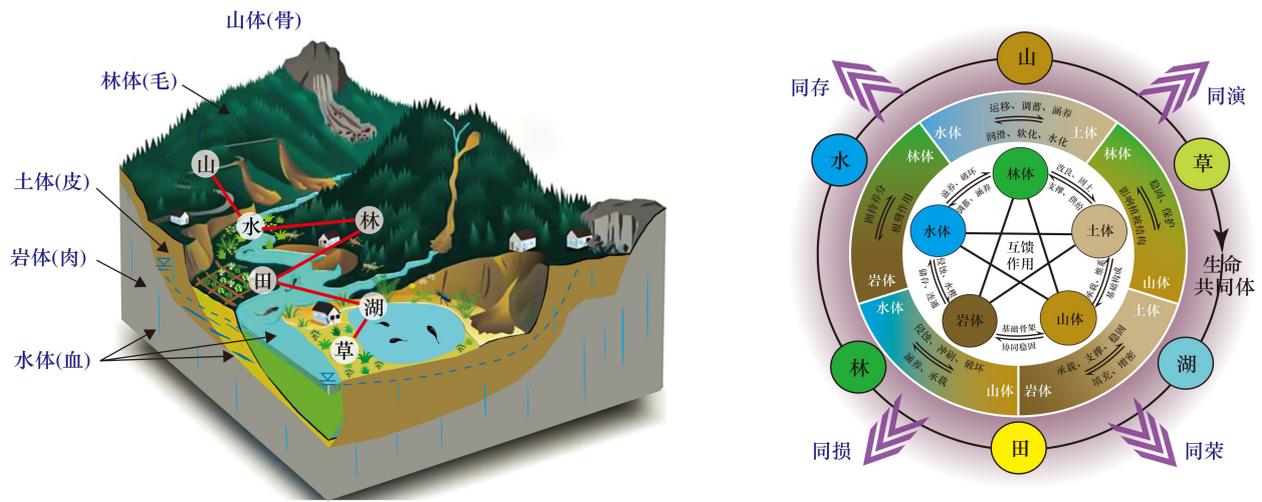


图5 秦岭五体互馈协同演进与“山水林田湖草生命共同体”科学内涵逻辑关系

Fig.5 Scientific connotation and logical relationship between the “five-body” collaborative evolution and the “life community”

秦岭山、水、林、田、湖、草等生态要素齐全、相互联系密切。而山水林田湖草生命共同体是指由山、水、林、田、湖、草等多种生态要素构成的有机整体,是具有复杂结构和多重功能的生态系统;同时,山水林田湖草生命共同体各要素之间通过能量流动与物质循环相互联系、相互影响,形成了相对独立又彼此依存的复杂关系,具有典型的同存-同演-同损-同荣演化规律,不能割裂对待。剖析秦岭林体-土体-岩体-山体-水体的互馈与协同演进机制,从生态-地质系统性科学角度,认识秦岭山水林田湖草生命共同体的同存-同演-同损-同荣规律,打通了生态与地质的内在联系,为开展秦岭生态环境保护提供了理论依据。据此,围绕“秦岭林体-土体-岩体-山体-水体的互馈与协同演进机制”这一关键问题,亟待解决:①秦岭林-土-岩-水-山体时空分布状况如何?存在哪些异质性特征?②秦岭“五体”如何协同演进与相互影响的?对应的互馈协同作用模型如何构建?③秦岭“五体”协同互馈作用是如何体现“山水林田湖草生命共同体”的同存-同演-同损-同荣规律的?通过依托秦岭开展生态地质环境研究,构建林体-土体-岩体-山体-水体互馈协同作用模型,为认知“山水林田湖草生命共同体”的同存-同演-同损-同荣规律提供研究示范。

2.3 秦岭生态损害-水土灾害-地质灾害共存递进演化机制

生态系统的一个重要特性是具有弹性和可塑性^[41],即:生态系统受到人类活动的干扰或气候变化的冲击,若没有超过阈值,也能通过自修复功能恢复到原来的平衡状态^[42]。然而,在极端气候变化和强烈人类活动的影响下,生态地质环境系统遭受过渡损害,乃至引发地质灾害,使得系统再平衡过程受到极大阻碍。秦岭是我国生态损害、水土灾害与地质灾害的高发地;依据山、岩、土、林破坏层次不同,秦岭生态地质环境的破坏

与失衡可界定为三类:(1)以植被破坏为主的地面生态损害;(2)以土壤侵蚀与流失为主的表层水土灾害;(3)以岩土体破坏为主的浅层崩滑灾害及以山体深部破坏为主的山地灾害,如图 7。秦岭生态损害、水土灾害和地质灾害虽分属三种不同破坏层次,但各自孕灾过程并非孤立,往往存在一定程度的关联性,导致其孕灾过程呈现逐级递进、层次演化特征^[43]。具体表现为:生态损害的发生往往会破坏地面植被系统^[8],而地面植被系统被破坏后,往往导致其固土效应相应减弱,进一步破坏稳定的土壤结构,使得土体结构强度降低,从而引发水土灾害^[44];而水土灾害的频繁发生会加速土壤侵蚀,为滑坡、泥石流等地质灾害的发生提供了天然环境。

按照 2.1 小节初步构建的秦岭生态地质环境系统框架体系,灾害地质环境作为“生态损害”的最常见形式,其多因自然条件劣化(包括:气候变暖、极端降雨或连续干旱等)、人类活动加剧(包括:过度开发、工程修建、居民点扩张及矿产开发等)原因而导致生态地质环境系统失衡,进而产生的生态损害、水土灾害及地质灾害等“三害”现象。因系统失衡发生节点差异与空间分异性特征,秦岭地面生态损害、表层水土灾害、浅深层地质灾害呈现互馈耦合关系,并表现为共存递进演化特征(图 6)。

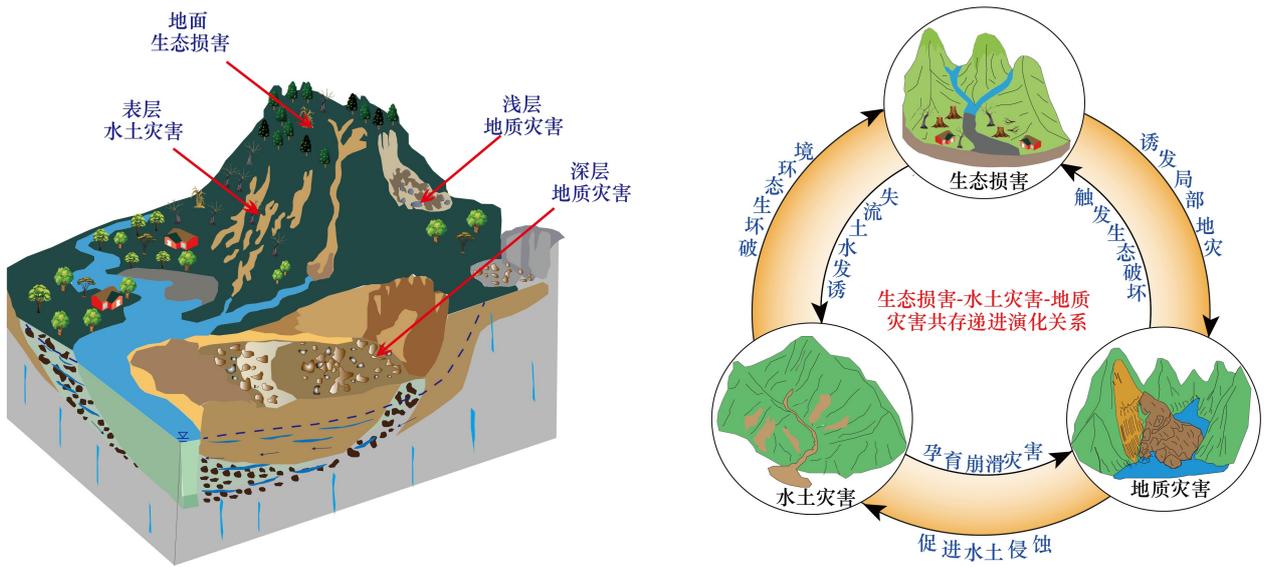


图 6 秦岭生态地质环境系统灾害类型及“三害”共存递进演化关系

Fig.6 The types of disasters and the coexistence and progressive evolution relationship of "three hazards" in Qinling eco-geological environment system

灾害的产生往往是因生态地质环境系统中林体、土体、岩体、山体、水体等某一或若干基体发生失衡而引起的连锁性反应,如:林体过度砍伐或破坏将会导致地表岩、土体裸露而引起水土流失风险;水体泛滥或枯涸将影响林体生长水平,并可导致岩、土体系列地质灾害问题;而山体的地质活动将极大改变附着体的生态机能,造成系统结构紊乱与功能失调。此外,生态损害往往会诱发后续性水土灾害与地质灾害;如:因土壤侵蚀、土壤污染、土壤退化及生物多样性减少等生态损害现象的持续发生,导致生态系统失衡;而失衡的后续表现会直接或间接引起水土流失、水土侵蚀、山洪等地表水土灾害,进而触发崩滑流等地质灾害。

秦岭地面生态损害、表层水土灾害、浅深层地质灾害互馈耦合;科学认识生态损害到地质灾害的递进演化关系,是生态地质环境系统研究框架体系中的重要工作。因生态损害演化至地质灾害牵涉到多要素、长时序、多区域等问题,需结合秦岭生态地质环境的多圈层、多要素特征,揭示水土灾害的孕育和触发机理,明晰不同水土灾害的生态损害机制,建立不同生态损害作用下的水土灾害、地质灾害时空变异模型,从灾害链角度认知生态损害-水土灾害-地质灾害的递进演化关系。同时,“三害”的发生时五体互馈作用失衡的产物,因此,认识生态损害与地质灾害的关系,须立足于五体协同演化过程及互馈作用机制,通过剖析灾变发生与五体协同失衡关键节点的内在关联,进而针对灾害对象类型、所处环境,建立秦岭生态地质环境多级韧性防控体系。据

此,围绕“秦岭生态损害-水土灾害-地质灾害共存递进演化关系”这一关键问题,亟待解决:①造成秦岭生态损害-水土灾害-地质灾害共存、递进的影响因素有哪些?存在何种时空变异特征?②秦岭生态损害-水土灾害-地质灾害协同驱动模式如何表征?关键转化节点如何精准识别?③秦岭生态损害-水土灾害-地质灾害风险韧性防控技术体系与管理策略如何构建?通过依托秦岭开展生态地质环境研究,建立秦岭“生态损害-水土灾害-地质灾害”共存递进演化理论,为秦岭生态灾害韧性防控和管理奠定理论基础。

2.4 秦岭人类环境-地质环境-生态环境动态平衡调控机制

秦岭作为中国中央山脉,自古以来人地互馈强烈、人地矛盾突出、人-地-生平衡关系不明。特别是改革开放以来,秦岭北麓山前-平原过渡带、南麓人口密集区、腹地人口集中区,人地互馈作用大幅度增强;并在极端气候频发的叠加影响下,生态风险将可能进一步加剧,生态系统服务功能受到显著影响。

生态地质环境是人类生存和发展的基本场所,人类依赖生态地质环境而生存和发展,同时人类活动又不断地改变着生态地质环境。其中,人类活动以改造生态环境为主要手段,进而影响着整个生态地质环境系统的演变。近年来,强烈的人地互馈作用造就了秦岭生态地质环境与人类社会相互作用、相互影响的复杂作用过程;同时,秦岭生态地质环境失衡受损产生的各类灾害,会对人类生产与生活造成严重损失。可见,人类环境-地质环境-生态环境之间的相互作用是一个复杂的系统问题,涉及到自然过程与人为因素的

双向互馈,具有多圈层、多过程、多效应等特征^[45]。具体而言,(1)生态环境是地质环境的“屏障”,对地质环境起着巨大的保护作用;生态环境圈层包括大气变化圈、生物繁衍圈、水文循环圈等,生态环境圈层的恶化往往会导致地质环境的脆弱,如:随着全球气候变暖的趋势增加,秦岭地区地质灾害发生频率明显增强,山洪、泥石流等地质灾害明显增多^[46];同时,改善生态环境可通过生态建设与环境保护予以实现,但地质环境是在数百万年乃至数亿年漫长的地质历史过程中逐渐形成的,具有难以恢复性特征;(2)地质环境是生态环境的“载体”,为生态环境的提供空间与物质来源;地质环境圈层包括岩土变动圈、构造变形圈等,因此,地质体特征、水文地质环境与生态环境状况之间存在着密切的相依联系,地质环境的好坏将直接关系到生态环境的治理效果;如:秦岭通过近年对秦岭区域历史遗留矿山、地质灾害隐患点的专项整治,为秦岭生态环境保护规划政策制订、秦岭水源保护区制度落地、秦岭生物多样性保护专项规划设计、生态核心功能区移民搬迁安置、秦岭北麓主体山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目推动奠定了良好基础;(3)人类环境以生态环境与地质环境为“场所”,通过改造生态环境与地质环境提供赖以生存的资源;人类活动圈是复杂的天-地-生-人互馈系统,其包括人类活动过程及人类活动效应。其中,人类活动过程多以改造生态环境为主要手段,通过工程活动、水事活动、农耕活动及开采活动影响着生态环境的变化,并部分直接或间接地影响着地质环境;而人类活动效应往往同时影响着生态环境与地质环境,造成生态环境污染、灾变的形成与地质灾害的发生。人类环境-地质环境-生态环境相互作用及影响关系见图7所示。

人类在建设生态环境的同时,必须有效地保护地质环境,营造人类环境-地质环境-生态环境的良好动态平衡体系;立足秦岭生态地质环境系统研究,应核心探索生态安全与人地协调的关系问题,研究气候变化和人类活动对生态地质环境变化的影响,分析生态系统破坏和地质灾害与地质-地貌-气候-人类活动的时序演变关系;研究失衡生态地质环境系统的自修复过程,阐明生态地质环境系统的自愈机制;研究人工措施对失衡生态地质环境系统再平衡作用,阐明人为正向干预下系统的再平衡机制,提出有针对性的生态安全和地质安全防护措施。据此,围绕“秦岭人类环境-地质环境-生态环境动态平衡调控机制”这一关键问题,亟待解决:①秦岭人类活动在生态地质环境演变过程扮演什么角色?如何科学评价人类活动对生态地质环境的影响效应?②秦岭生态地质环境系统动态平衡调控模式如何科学构建?③如何构建地质环境-生态环境-人类环境相协调的生态地质安全防控理论?④如何基于人地协调思路提出针对性生态地质安全调控对策?通过依托秦岭开展生态地质环境研究,建立人类环境-地质环境-生态环境动态平衡调控模式,为秦岭人地协调和生态安全调控提供可持续化理论基础(图8)。

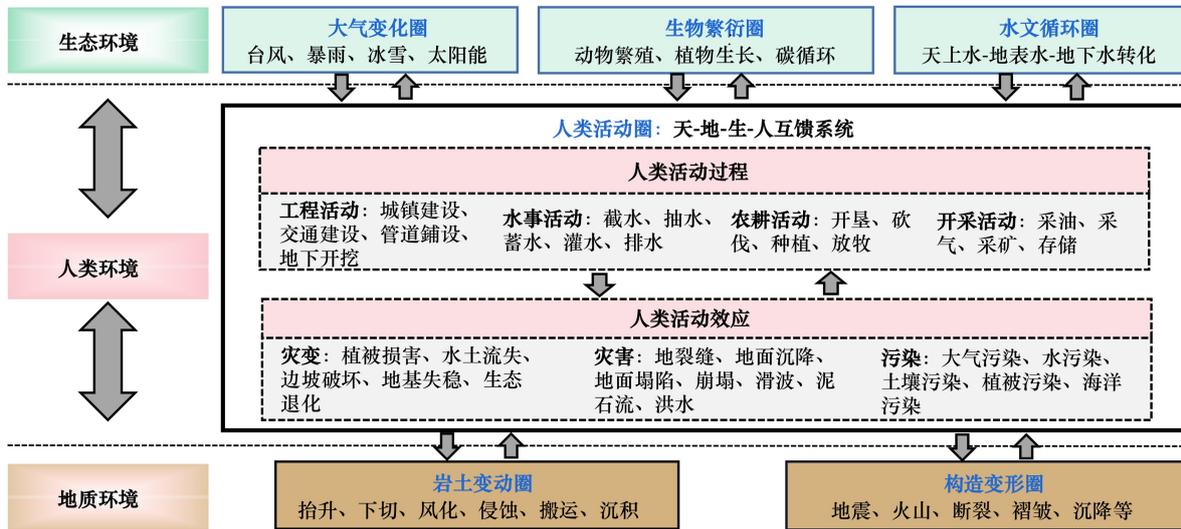


图7 人类环境-地质环境-生态环境圈层作用关系

Fig.7 Interaction and impact relationship between human environment, geological environment and ecological environment

3 结论与展望

生态地质环境系统研究是当前环境地球科学的新交叉前沿领域^[47]。依托秦岭这一催生生态地质基础理论、形成生态地质保护对策的理想实践地,探究地球浅表层生态地质环境系统构成与本底特征,掌握生态地质环境系统要素协同互馈关系,揭示生态失衡引起的灾害共存递进演化机制,进而建立生态地质环境系统动态平衡理论与安全防控对策,是推动秦岭生态环境保护的基础性工作,也是为我国生态文明建设与生态保护工作提供系统、可靠、及时的科学依据;同时,研究可为健全生态地质学学科体系、形成生态地质环境系统理论范式提供基础保障。上述科学命题值得深入探索和思考,具体来讲,有以下5个方面展望。

3.1 剖析秦岭地质环境对生态环境制约与影响作用,构建生态地质环境系统框架体系

秦岭生态问题表象在水、土、气、生,根在地质。开展生态秦岭研究,应着重关注地质环境对生态环境的制约、影响作用机制。亟待开展秦岭生态地质环境系统要素及结构组成本底探查,掌握生态地质环境系统要素及结构的时空变异规律,并探索构造地质环境、地貌地质环境对生态环境的承载与制约能力,揭示岩石地质环境、土壤地质环境及水文地质环境对生态环境的供给保障及控制机制等^[48];同时,应关注灾害地质环境与人类活动环境对生态环境的损害与扰动影响过程及机制,最终构建以地质环境为基础的生态地质环境系统框架体系,形成生态地质环境系统的全面化认识。

3.2 揭示秦岭“五体”的互馈与协同演进机制,丰富“山水林田湖草生命共同体”科学内涵

秦岭五体要素齐全、内生关系复杂、互馈作用密切。开展生态秦岭研究,应着重关注林体-土体-岩体-山体-水体的互馈与协同演进机制。亟待开展秦岭林体-土体-岩体-山体-水体等“五体”协同演进过程认识,构建

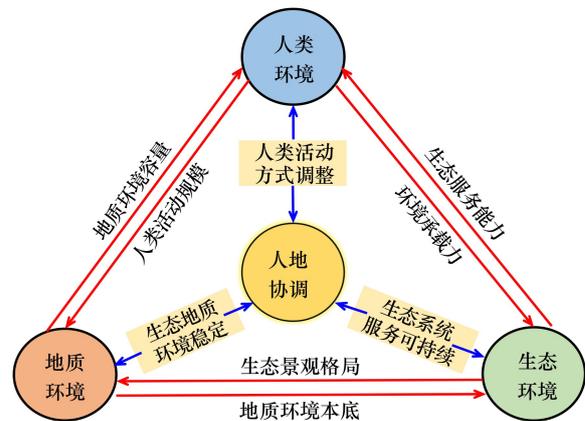


图8 基于人地协调的秦岭人类环境-地质环境-生态环境动态平衡关系

Fig.8 Dynamic balance relationship between human environment, geological environment and ecological environment based on human-land coordination in Qinling mountains

“五体”互馈协同作用模型;同时,应重点探索生态要素与生态地质体的内在联系,关注秦岭“山水林田湖草生命共同体”同存-同演-同损-同荣规律,探索林体、土体、岩体、山体、水体等生态地质体的协同演进对生态要素演化的控制影响机制,深刻认识“山水林田湖草生命共同体”“四同”演化的本质是“五体”互馈与协同演进,丰富“山水林田湖草生命共同体”生态理念的科科学内涵。

3.3 明晰秦岭生态损害-水土灾害-地质灾害共存递进演化关系,打通生态失衡与地质灾害的关联通道

秦岭地面生态损害、表层水土灾害、浅深层地质灾害互馈耦合。开展生态秦岭研究,应着重关注生态损害-水土灾害-地质灾害共存递进演化关系;后续亟待开展秦岭生态损害-水土灾害-地质灾害共存与互馈循环特征,探索生态损害-水土灾害-地质灾害递进演化的关键驱动因子及转化模式;并从生态地质环境系统的失衡韧性能力角度,探索生态失衡与地质灾害风险水平及失衡概率,构建生态损害、水土灾害与地质灾害的联动防控技术方法,形成生态损害-水土灾害-地质灾害韧性防控体系,保障生态地质环境的健康运行。

3.4 掌握人类环境-地质环境-生态环境动态平衡机制,完善基于人地协调的生态安全保障体系

秦岭人地互馈强烈,人地矛盾突出,人-地-生内在关系不明。开展生态秦岭研究,应着重关注人类环境-地质环境-生态环境动态平衡机制。亟待开展秦岭人类活动对生态地质环境的影响过程及影响效应研究,探索人类活动环境与地质环境、生态环境的联动互馈模式,认知地质环境-生态环境-人类环境的作用过程及动态平衡关系;并从人地协调角度出发,探究生态地质环境失衡区的自愈修复机制及人工干预再平衡机制,探索人类环境-地质环境-生态环境动态平衡调控模式,构建构建生态地质安全风险的动态监测、生态修复与调控对策,完善生态安全保障体系^[49-51]。

3.5 探索秦岭生态-地质-人类活动的联动过程及影响规律,形成生态地质环境理论研究范式

秦岭生态地质特色鲜明,在我国生态文明建设中的地位突出。开展生态秦岭研究,应着重探索秦岭生态-地质-人类活动的联动过程及影响规律;后续应秉持“以认知与改善地质环境的生态载体功能为基础,以提升生态环境的韧性与协调能力为手段,以营造良好的人类活动环境为目标”的生态地质环境系统研究理念,重点梳理生态-地质-人类活动的相互作用关系,探索生态地质基础理论及生态地质保护对策,打造生态地质环境理论研究范式,推动国家生态文明建设高质量发展。

此外,在开展基础理论研究同时,后续应重点突破秦岭本底特征调查手段、五体协同互馈关系评价方法、灾害递进演化过程识别、调控技术集成与优化等技术难题,综合利用地质调查、现场监测、室内试验、模型试验、数值模拟、理论分析等多手段,强化多学科、多领域、多平台交叉融合,打造秦岭生态地质环境的研究新业态,当好秦岭生态卫士,让秦岭“美景永驻、青山常在、绿水长流”。

参考文献(References):

- [1] 黄润秋. 深入学习贯彻党的二十大精神 努力建设人与自然和谐共生的美丽中国. 环境与可持续发展, 2022, 47(6): 17-20.
- [2] 黄润秋. 深入贯彻实施噪声污染防治法 用法治方式法律武器守护和谐安宁家园. 环境保护, 2022, 50(13): 8-10.
- [3] 郝吉明, 王金南, 张守攻, 吴丰昌, 蒋洪强, 吴文俊, 陈吕军, 张林波, 刘年磊. 长江经济带生态文明建设若干战略问题研究. 中国工程科学, 2022, 24(1): 141-147.
- [4] 傅伯杰. 加强基础研究的系统性和综合性, 助力黄河流域生态保护与高质量发展. 中国科学基金, 2021, 35(4): 503.
- [5] 彭建兵, 兰恒星, 钱会, 王文科, 李荣西, 李振洪, 庄建琦, 刘鑫, 刘世杰. 宜居黄河科学构想. 工程地质学报, 2020, 28(2): 189-201.
- [6] 于贵瑞, 王秋风, 杨萌, 陈智. 生态学的科学概念及其演变与当代生态学学科体系之商榷. 应用生态学报, 2021, 32(1): 1-15.
- [7] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69(8): 1052-1059.
- [8] Brantley S L, McDowell W H, Dietrich W E, White T S, Kumar P, Anderson S P, Chorover J, Lohse K A, Bales R C, Richter D D, Grant G, Gaillardet J. Designing a network of critical zone observatories to explore the living skin of the terrestrial Earth. Earth Surface Dynamics, 2017, 5(4): 841-860.
- [9] Li X, Cheng G D, Fu B J, Xia J, Zhang L, Yang D W, Zheng C M, Liu S M, Li X B, Song C Q, Kang S Z, Li X Y, Che T, Zheng Y, Zhou Y Z, Wang H B, Ran Y H. Linking critical zone with watershed science: The example of the Heihe River basin. Earth's Future, 2022, doi.org/10.1029/2022EF002966.
- [10] Richter D D Jr, Mobley M L. Environment. Monitoring Earth's critical zone. Science, 2009, 326(5956): 1067-1068.
- [11] 李中恺, 李小雁, 周沙, 杨晓帆, 付永硕, 缪驰远, 王帅, 张光辉, 吴秀臣, 杨超, 邓元红. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2105-2138.

- [12] Kumar P, Le PVV, Papanicolaou A N T, Rhoads B L, Anders A M, Stumpf A, Wilson C G, Bettis E A, Blair N, Ward A S. Critical transition in critical zone of intensively managed landscapes. *Anthropocene*, 2018, 22:10-19.
- [13] Preti F, Giadrossich F. Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (*Spartium junceum* L.). *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(9): 1713-1726.
- [14] 言志信, 闫昌明, 王后裕. 植被护坡的根和土力学作用. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(4): 436-440.
- [15] Mao Z. Root reinforcement models: classification, criticism and perspectives. *Plant and Soil*, 2022, 472(1): 17-28.
- [16] 彭建兵, 兰恒星. 略论生态地质学与生态地质环境系统. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(6): 877-893.
- [17] 李君轶, 傅伯杰, 孙九林, 洪增林, 张百平, 王晓峰, 白红英, 王飞, 赵振斌, 曹小曙. 新时期秦岭生态文明建设: 存在问题与发展路径. *自然资源学报*, 2021, 36(10): 2449-2463.
- [18] 陈怡平. 大秦岭生态文明建设的意义与对策. *地球环境学报*, 2019, 10(1): 1-11.
- [19] 李大伟, 段克勤, 石培宏, 李双双, 尚激, 张召鹏. 秦岭中部山地降水的垂直变化研究. *地理学报*, 2022, 77(7): 1762-1774.
- [20] 宗静婷. 秦岭: 中华地理的自然标识. 西安: 西安出版社, 2020.
- [21] 张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 1996, 26(3): 193-200.
- [22] 孟庆任. 秦岭的由来. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(4): 412-420.
- [23] 陕西省人民政府办公厅 陕西省人民政府办公厅关于印发秦岭生态环境保护总体规划的通知. *陕西省人民政府公报*, 2020(17): 3-45.
- [24] 马琪, 王鹏涛, 杨晓俊, 袁家根, 李娟娟, 刘文宗. 秦岭山地生物多样性保护红线划分研究. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(3): 634-642.
- [25] 马琪, 张园, 袁家根. 秦岭生物多样性优先区植物保护重要区识别与空缺分析. *西北林学院学报*, 2022, 37(2): 180-185.
- [26] 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 陈发虎. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(6): 1010-1020.
- [27] 陕西省发展和改革委员会 陕西省财政厅. 秦岭生态系统综合管理研究. 北京: 中国发展出版社, 2018.
- [28] 何自立, 晁智龙, 王双银, 马孝义. 秦岭山脉典型流域水系分形特征及空间分异性. *水电能源科学*, 2019, 37(9): 13-16.
- [29] 陕西省地方志办公室, 陕西年鉴 2019[G/OL], 2022. 10. 14.
- [30] 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 姚安平. 关于秦岭造山带. *地质力学学报*, 2019, 25(5): 746-768.
- [31] 郭安林, 张国伟, 董云鹏, 郭泱泱, 姚安平. 秦岭: 地球多圈层相互作用的热点. *西北大学学报: 自然科学版*, 2021, 51(6): 922-934.
- [32] 董云鹏, 杨钊, 孙圣思, 史小辉, 何登峰, 惠博, 龙晓平, 郭安林. 秦岭隆升过程及其如何控制气候环境?. *地球科学*, 2022, 47(10): 3834-3836.
- [33] 强菲, 赵法锁, 党亚倩. 陕南秦巴山区地质灾害与影响因素的相关性分析. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(3): 557-562.
- [34] 陕西省水利厅, 2021 年陕西水利发展统计公报[G/OL].
- [35] 王佳运, 李林, 郑定国, 武立. “8·12”山阳滑坡视向滑动特征与运动过程. *灾害学*, 2018, 33(1): 111-116.
- [36] 查方勇, 郭威, 张健, 杨望曦, 张东薇, 魏梦媛. 秦岭终南山世界地质公园地质遗迹资源及价值评价. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(2): 182-187.
- [37] 刘赫. 秦岭隧道建造关键技术. *中国铁道科学*, 2003, 24(2): 132-136.
- [38] 崔国屹, 张艳, 晁阳, 赵永华, 潘博华. 秦岭地区近 40 年土地利用变化及其生态环境效应. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 319-326.
- [39] 黄润秋. 生态环境地质的基本特点与技术支持. *中国地质*, 2001, 28(11): 20-24.
- [40] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell S, Fetzer I, Bennett E, Biggs R, Carpenter S, Vries W, de Wit C, Folke C, Gerten D, Heinke J, Persson L, Ramanathan V, Reyers B, Sörlin S. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347(6223): 736-747.
- [41] 于贵瑞, 张雪梅, 赵东升, 邓思琪. 区域资源环境承载力科学概念及其生态学基础的讨论. *应用生态学报*, 2022, 33(3): 577-590.
- [42] Sivapalan M. From engineering hydrology to Earth system science: milestones in the transformation of hydrologic science. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(3): 1665-1693.
- [43] Veldkamp E, Schmidt M, Powers J S, Corre M D. Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1:(11): 590-605.
- [44] Fan X M, Scaringi G, Korup O, West A J, van Westen C J, Tanyas H, Hovius N, Hales T C, Jibson R W, Allstadt K E, Zhang L M, Evans S G, Xu C, Li G, Pei X J, Xu Q, Huang R Q. Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms, and impacts. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(2): 421-503.
- [45] 欧阳志云, 王桥, 郑华, 张峰, 侯鹏. 全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查评估. *中国科学院院刊*, 2014, 29(4): 462-466.
- [46] 王晓玲, 任燕. 秦岭山区近 50 年降水差异及可能局地成因探讨. *气候与环境研究*, 2012, 17(6): 911-918.
- [47] Stewart I. Sustainable geoscience. *Nature Geoscience*, 2016, 9(4): 262.
- [48] 郭青海, 仇铂添, 王鹏飞, Soebekti Chatarina Regina. 基于文献计量分析的中国乡村生态学研究综述. *生态学报*, 2022, 42(17): 6922-6936.
- [49] 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 程昌秀, 李琰, 冯晓明, 刘焱序. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 504-509.
- [50] 彭建兵, 徐能雄, 张永双, 夏开文, 薛翊国, 张彬, 杨国香, 陈剑, 王飞永, 臧明东, 梅钢, 穆文平, 王祚鹏, 李星, 张欣. 论地质安全研究的框架体系. *工程地质学报*, 2022, 30(6): 1798-1810.
- [51] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. *生态学报*, 2017, 37(2): 341-348.