

川西锂矿带资源环境特征与生态地质环境承载力评价

代力, 谭洪旗, 周雄

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 中国地质调查局矿山生态保护修复技术中心(西部), 自然资源部战略性矿产综合利用工程技术创新中心, 四川 成都 610041)

摘要: 这是一篇地球科学领域的论文。川西锂矿带是我国硬岩型锂矿资源最丰富的地区, 然而, 区内生态地质环境脆弱, 实现资源、环境和经济的协调发展一直是困扰区域资源深度开发的难题。本文系统梳理了锂矿带内自然资源、矿产资源、地质环境特征以及主要存在的环境地质问题, 构建了基于地质环境、生态环境、社会环境三大子系统的生态地质环境承载力评价指标体系, 遴选并获取了19项基础评价指标数据信息, 开展全域承载力评价。结果表明: 川西锂矿带地质环境相对安全稳定, 带内现有矿业活动对区域生态环境影响并不显著, 人类生产生活影响范围有限; 中等及以上承载力国土面积比例达到79.16%, 锂矿资源集中区内生态地质环境承载力较高, 整体生态地质环境状况良好。

关键词: 地球科学; 川西锂矿带; 生态地质环境承载力; 锂矿资源; 环境地质

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.024

中图分类号: TD985; P66 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)04-0157-12

锂是重要的战略性矿产, 是现今新能源产业的资源命脉。硬岩型锂矿是目前全球范围内锂资源的主要供给。中国硬岩型锂矿主要集中产出阿尔泰锂矿带、川西锂矿带和华南锂矿带三大锂矿带内^[1]。川西实际控制的硬岩型锂矿资源储量已超300万t, 在全国处于首位, 在世界上也名列前茅^[2]。鉴于其巨大的资源储量和目前不可替代的重要性, 川西地区是近十年以及未来较长一段时间内锂矿和稀有金属地质勘查工作的重点和相关方法理论研究的热点^[3-7]。

川西地区既是国家锂矿战略性矿产资源保障基地, 也是长江黄河上游生态安全屏障。区内生态地质环境脆弱, 实现资源、环境和经济的协调发展一直是困扰区域资源深度开发的难题。生态脆弱区矿业开发是环境保护与经济发展之间的敏感话题, 环境承载力则为二者之间的平衡设定了可度量的标尺。环境承载力逐渐从单要素承载力发展到多要素承载力, 从资源承载力延伸到资源环境协同承载力, 从局域承载力发展到区域综合承载力^[8-9]。生态地质环境承载力是评价地质环

境、生态环境、社会环境三者共同制约与影响的多系统协同设计, 面向特定评价目标确定的生态地质环境所能承受人类活动阈限^[10]。生态地质环境承载力评价服务于大区域自然资源、生态地质关键区、国土空间规划等领域, 涉及市域、流域、省域、县域等尺度的评价工作。

川西地域辽阔, 地形地貌复杂, 社会经济发展不均一, 涉及甘孜、阿坝两州及各县乡等多级行政主体, 尚未形成统一的跨区域规划, 面向区域整体资源开发的总体研究支撑较少。本文拟从川西锂矿集中分布区域的全域整体视角出发, 系统梳理分析区域资源分布、环境地质问题特征, 并遴选地质环境、社会经济、生态环境三方面多项评价指标, 开展区域性生态地质环境承载力评价综合研究, 以期为该区域资源勘查、环境保护、国土空间规划和政策制定提供支撑和服务。

1 川西锂矿带概况

1.1 川西锂矿带范围划分

李健康等最早对中国锂矿成矿带进行了划分,

收稿日期: 2023-06-15

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(DD20190185、DD20230039)

作者简介: 代力(1988-), 男, 硕士, 工程师, 从事应用地球化学与矿山地质环境调查研究。

并根据锂矿产地的分布规律划分为 12 个锂成矿带^[1],王登红等后续把锂成矿区带从 12 个增加到 16 个^[11]。该划分方案中川西地区属于划分方案中 Li8 号带,即松潘—甘孜锂成矿带。该锂成矿带分布范围较广,广义上从四川西部甘孜阿坝地区向西延至新疆大红柳滩稀有金属成矿区以西,长度超过 2800 公里。付小方等根据川西地区稀有金属成群成带的产出特征,将川西细分为划分为石渠扎乌龙稀有金属成矿区、康定—雅江稀有金属成矿区(甲基卡矿田)、马尔康—金川稀有金属成矿区(可尔因矿田)以及九龙稀有金属成矿区^[12]。因此为开展区域内资源、环境、经济综合效应方面综合研究,以锂矿空间分布成群成带特征为重点依据,结合行政区划、矿业开发环境影响、社会经济条件等因素,将甘孜州丹巴县、九龙县、壤塘县、雅江县、道孚县、康定市和阿坝州马尔康市、金川县共 8 个市县的行政区划范围作为本次评价划定的川西锂矿带范围。该范围不代表成矿理论上的成矿带意义,只是相对代表了川西硬岩型锂矿的相对集中分布性,严格意义上可视为川西锂矿集中分布带。另外,因扎乌龙位于石渠县,与其他锂矿区空间距离较远,不具备集中分布特征,因此不列入本次研究评价范围。

1.2 自然资源特征

(1) 国土空间广袤。川西锂矿带行政区划隶属于四川省甘孜藏族自治州和阿坝藏族羌族自治州,包括丹巴县、金川县、九龙县、壤塘县、马尔康市、雅江县、道孚县和康定市共 8 个市县(图 1)。锂矿带南北长约 484 km,东西宽约 188 km,地理位置东经 100.38~102.67°,北纬 28.31~32.68°,全域国土面积约 56139 km²,约占甘孜州和阿坝州面积总和的 23.82%,四川省面积的 11.55%。

(2) 地形地貌复杂。带内总体海拔较高,多集中于 3500~4500 m 之间,3500 m 以上高海拔区域占整个锂矿带的面积的 79.29%。丘状高原、高山峡谷和河谷平原共同构成区内地貌格局,地貌差异巨大。山地(高起伏)地貌约占整个区域的 66%,台地、平原、丘陵面积较少,主要分布在城镇周边,平原地貌几乎无分布。地势由西向东逐渐降低,北部山地起伏,中部区域地势北高南低,南部为深切割区。带内坡度平均 30°以上,部分地段高达 70°。

(3) 林草资源丰富。带内区域整体植被覆盖

度较高,大部分地区植被覆盖度在 60% 以上。分布林地 3079.43 万亩,占四川省林地总量的 8.08%;草地 3669.06 万亩,占四川省草地总量的 25.25%。耕地稀少,以旱地为主,面积仅 77.5 万亩,占国土面积的 0.92%,但占据了甘孜州和阿坝州耕地总面积的 28%,主要分布于大渡河、雅砻江、鲜水河流域河谷地带。

(4) 社会经济欠发达。带内共下辖 119 个乡镇,28 个镇。截止 2020 年末共有常住人口 496072 人,约占甘孜州和阿坝州常住人口总数的 25.7%,国内生产总值占甘孜州和阿坝州总量的 29.96%。

1.3 区域地质简况

(1) 川西锂矿带出露地层主要有中元古界—新元古界,古生界奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系,中生界三叠系及新生界第四系。三叠系地层全区广泛出露,占全区面积的 82.74%,其次为泥盆系、奥陶系地层(图 1a)。区域内地质构造主要沿北西-南东走向,分布有鲜水河断裂带、乾宁—康定断裂带、折多塘断裂带及石棉断裂带。

(2) 岩(土)体工程地质性质复杂多样,总体划分为岩浆岩建造、碎屑岩建造、变质岩建造、碳酸盐岩建造 4 大类型、6 个工程地质岩组。碎屑岩建造分布最广,占据 79.78% 的分布面积,其中以坚硬层状碎屑岩为主的岩组(各时代的碎屑岩、砾岩、砂岩、页岩)分布范围最广,占带内面积的 53.15%,主要分布于带内北部壤塘—金川一带、中部道孚—雅江一带、南部九龙线北侧区域;其次为碎屑岩夹碳酸盐岩岩组,占带内面积的 26.62%。岩浆岩建造以坚硬块状各类侵入岩岩组为主,呈串珠状不连续南北向分布于带内,相对集中于马尔康—金川—丹巴一线,康定、九龙西侧,约占带内面积 9.50%。变质岩建造包括各时代变质的片岩、板岩、千枚岩,以及深变质混合岩,片麻岩等,主要分布于康定—丹巴一带,九龙县南侧,约占区内面积 9.45%(图 1b)。

(3) 地下水类型为碳酸盐裂隙溶洞水、碎屑岩孔隙裂隙水、岩浆岩变质岩裂隙水三种类型,主要以碎屑岩孔隙裂隙水为主,全区广泛存在,约占 83.05% 的分布面积(图 1c)。碎屑岩类结构致密,抗风化能力强,风化裂隙不甚发育,透水性微弱。其次为岩浆岩变质岩裂隙水,其分布范围位置与岩浆岩建造、变质岩建造基本相近,约占区内面积 15.49%。

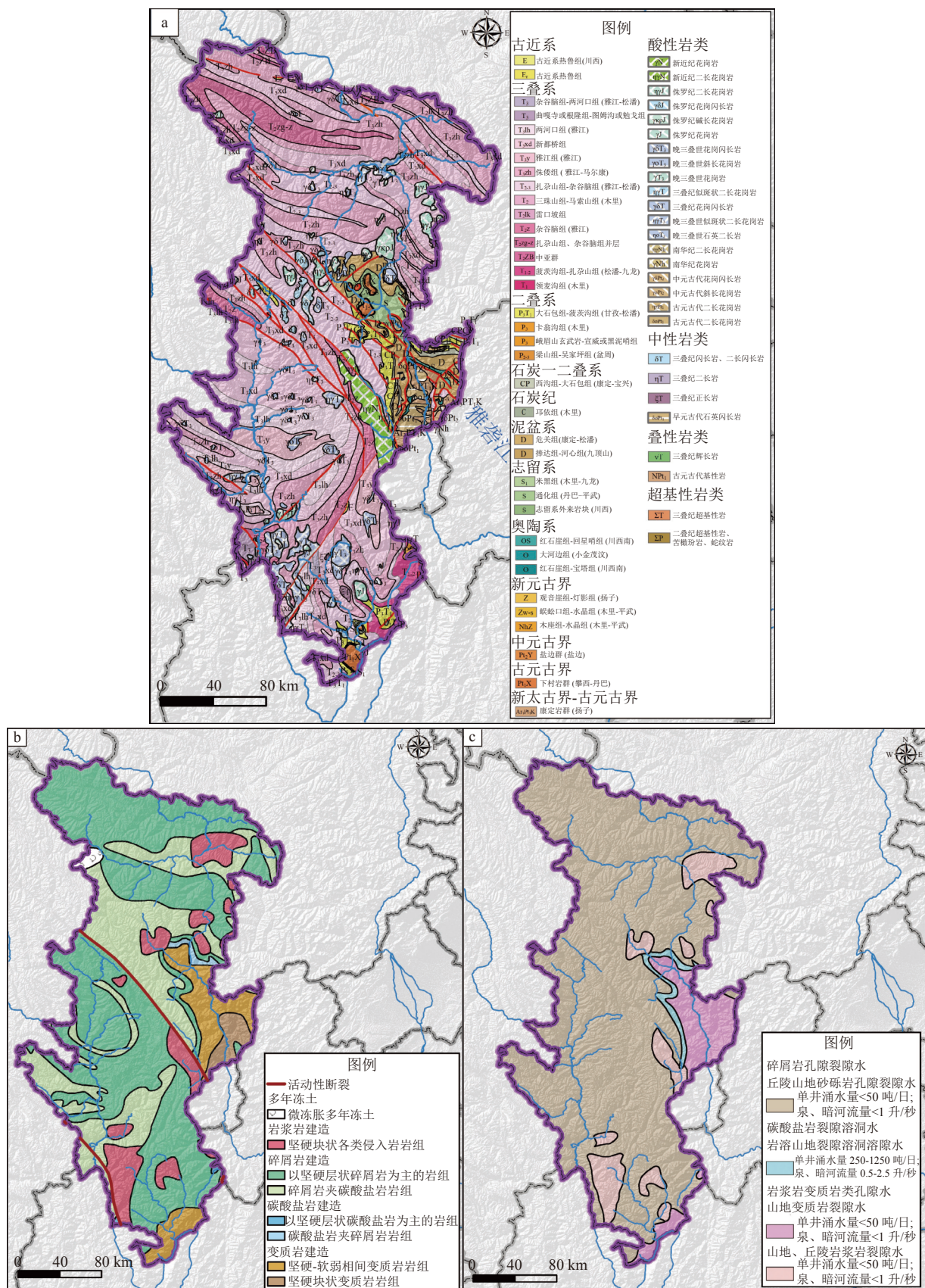


图1 川西锂矿带区域地质(a)、工程地质(b)和水文地质(c)
Fig.1 Regional geology(a), engineering geology(b) and hydrogeology map(c)

2 资源环境特征

2.1 矿产分布

川西锂矿带资源丰富，带内矿山类型主要以贵金属、非金属、稀有金属、有色金属为主。截止 2017 年，带内分布有 112 座矿山，占所属的甘

孜阿坝两州共有总数 202 座的 55.4%，（图 2a）。其中贵金属矿山 48 座，建材及其他非金属矿山 25 座，有色金属矿山 13 座，冶金辅助原材料非金属矿山 7 座，能源矿山 6 座，铂族金属矿山 3 座，黑金属矿山 2 座，稀有稀土及分散元素矿山 6 座，特殊非金属矿产各 2 座。

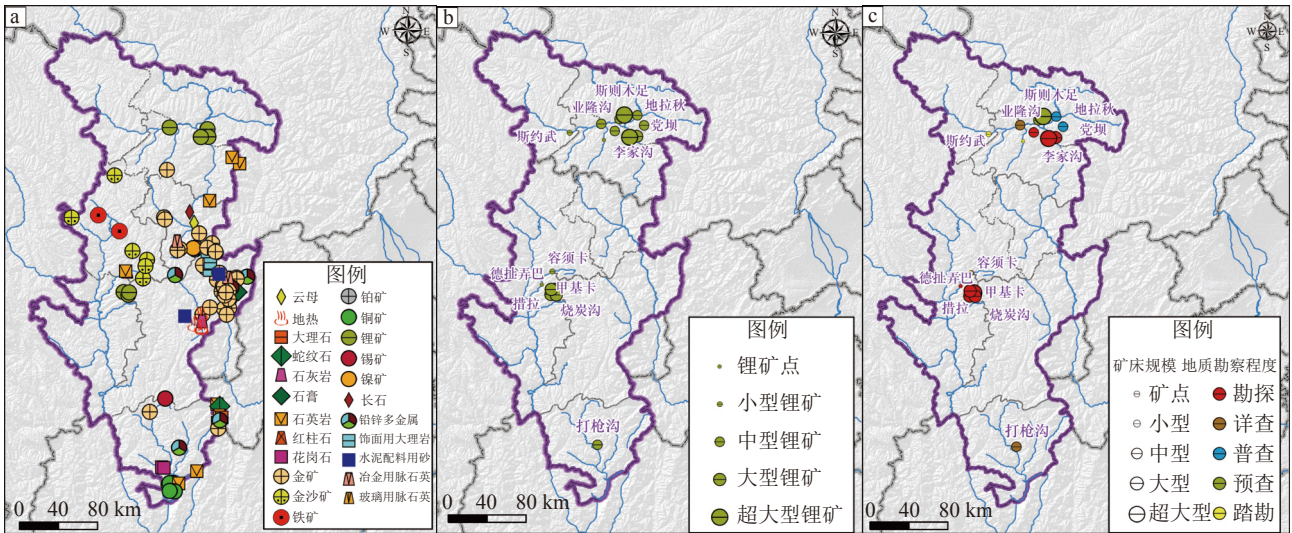


图 2 川西锂矿带矿山分布 (a)、锂矿资源分布 (b) 和锂矿开发程度 (c)
Fig.2 Mine distribution(a), lithium deposits(b) and lithium survey degree map(c)

带内矿产资源呈现出聚集性分布，超过 90% 的矿山分布在康定、九龙、丹巴、道孚四县内，其中康定市分布矿山最为集中，共有 52 座矿山分布于此，占带内矿山总数的 46.43%，主要以贵金属（金）矿为主，共 32 座；其次为九龙县，约占 18.75% 的矿山总量分布，主要以有色金属和建材类矿山为主；壤塘县最少，没有矿山分布。从矿

产资源的规模上看，区内矿山以小型居多。
2.2 锂资源分布情况

川西锂矿带锂资源主要集中分布于带内北部可尔因地区、中部甲基卡地区、南部九龙地区三处。带内目前发现的矿点以上规模的锂矿约有 20 处，其中大型及以上锂矿 7 处，中型 8 处，小型及矿点 5 处（图 2b，表 1）。

表 1 川西锂矿带锂矿床资源信息
Table 1 Information of lithium deposits in the western Sichuan lithium belt

编号	矿床地名	地理位置	集中区	主矿种	勘查程度	规模
1	斯约武	阿坝州壤塘县	可尔因	锂、铍	踏勘	小型
2	瓦英锂	阿坝州马尔康	可尔因	铌、钽	普查	矿点
3	木尔基	阿坝州马尔康	可尔因	锂、铍、铌钽	普查	中型
4	地拉秋	阿坝州马尔康	可尔因	锂	普查	中型
5	党坝	阿坝州马尔康	可尔因	锂	勘探	大型
6	观音桥	阿坝州金川县	可尔因	锂、铍、铌钽	详查	中型
7	年克	阿坝州金川县	可尔因	铍、锂、铌钽	预查	中型
8	业隆沟	阿坝州金川县	可尔因	锂	勘探	中型
9	斯曼措沟	阿坝州金川县	可尔因	锂	预查	小型
10	李家沟	阿坝州金川县	可尔因	锂、铍、铌钽	勘探	超大型
11	木迪	阿坝州金川县	可尔因	锂、铌	踏勘	矿点
12	斯则木足	阿坝州马尔康	可尔因	锂	预查	超大型

编号	矿床地名	地理位置	集中区	主矿种	勘查程度	规模
13	普尔-色里	阿坝州马尔康	可尔因	锂、铷	预查	中型
14	打枪沟	甘孜州九龙县	九龙	铍、锂	详查	中型
15	木绒	甘孜州雅江县	甲基卡	锂、铌钽	勘探	矿点
16	甲基卡	甘孜州康定县	甲基卡	锂、铍、铌钽	勘探	超大型
17	措拉	甘孜州雅江县	甲基卡	锂、铍、铌钽	勘探	大型
18	烧炭沟	甘孜州雅江县	甲基卡	锂、铍、铌钽	勘探	大型
19	德扯弄巴	甘孜州雅江县	甲基卡	锂、铍、铌钽	勘探	大型
20	容须卡	甘孜州道孚县	甲基卡	锂、铍、铌钽	详查	中型

(1) 可尔因锂矿集中区，地处金川县、马尔康市、壤塘县。可尔因及周边目前已发现锂矿13处，其中金川县6处、马尔康6处、壤塘县1处。矿床规模上，现有超大型锂矿2处（李家沟、斯则木足）、大型1处（党坝）、中型6处、小型2处、矿点2处。地质勘查程度达到勘探的3处、详查1处、普查3处、预查4处、踏勘2处，总体地质勘查工作程度相对较高（图2c）。根据各项资料汇编显示，区内氧化锂资源量约142万t。

(2) 甲基卡锂矿集中区，地处康定县、道孚县、雅江县。甲基卡及周边目前已发现锂矿6处，其中康定市1处、道孚县1处、雅江县4处。矿产规模上，该区内现有超大型锂矿1处（甲基卡）、大型3处（措拉、烧炭沟、德扯弄巴）、中型1处、矿点1处。地质勘查程度达到勘探的5处、详查1处（图2c），总体地质勘查工作程度较高，区内氧化锂资源量约253万t。

(3) 九龙锂矿集中区，地处九龙县南部。该区及周边目前已发现锂矿1处，为打枪沟锂铍矿，矿床氧化锂资源量3.3万t，氧化铍资源量5946t，达到中型规模^[4]。此外，九龙地区还发现有洛莫铍矿床、若登铍矿、埃今铍矿、上基拱铍矿等中小型矿床（点）。九龙地区已发现锂矿资源量较少，矿脉较小，但九龙岩体的外围也具有一定的找矿潜力，有希望发现高品位的稀有金属矿脉^[4]。

2.3 主要环境地质问题

(1) 地震灾害频发。川西锂矿带位于松潘—甘孜造带，石渠—雅江中央陆缘褶皱—推覆带。区内构造线方向以北西—南东为主，北东向次之，鲜水河断裂为该区域的主体构造，断裂总体走向呈NW40°~50°，长约350km，规模宏大。鲜水河断裂是活动断裂，历史上具有多期活动的特

征，现今仍在活动。该断裂的滑动速率高，地震强度大，是中国大陆地震活动最强的断裂之一。历史上这条地震带地震活动频繁，震级大，破坏烈度强，堪称全川之冠。自1630年以来，在这条地震带上发生7级以上地震即达9次。近百年来，锂矿带内共发生4级以上地震43次，6级以上地震8次，最大历史震级7.5级（图3a）。

(2) 地质灾害点多面广。川西锂矿带内存在地质灾害隐患点3295处（截止2021年7月），约占甘孜阿坝两州隐患点总数的27.6%、四川省隐患点总数的10.08%，与国土面积对应比例相近。灾害类型主要以崩塌、滑坡和泥石流为主，其中崩塌497处，滑坡1187处，泥石流1444处；地质灾害规模主要以小型、中型为主，占总灾害数量的94.9%；险情等级以小型为主，占总量的83.6%；灾害诱发因素主要为降雨、地震—降雨，占总数的83.1%。地质灾害在带内各个区县均有分布，相对集中于马尔康市、金川县、丹巴县和雅江县地区，地质灾害高易发区主要位于马尔康镇—观音桥镇，河口镇—金川镇，巴旺乡—三合乡，孔色乡—吉居乡以及九龙县的南部地区（图3b）。带内地质灾害呈现出沿雅砻江干流、大金川、鲜水河、九龙河等两岸线形集中分布特征，在康定—道孚一线的鲜水河强震活动区，地质灾害沿断裂带走向线分布。

(3) 矿山地质环境问题不容忽视。带内矿产资源开发带了诸多矿山环境地质问题，主要为矿山地质灾害、地下含水层破坏、地形地貌景观破坏、废水废液固废、土地压占与损毁。土地压占与损毁是区内最严重的环境问题。带内112座矿山合计面积172.7934km²，占甘孜、阿坝两州矿山总面积的78.81%，占川西锂矿带国土面积的0.31%；造成的土地压占与损毁5.1×10⁶m²，占甘

孜、阿坝两州压占与损毁总面积的 25.76%。矿山地质环境影响严重的矿山 10 处, 占带内矿山总数的 8.93%, 主要分布于康定、丹巴、道孚县; 影响

较严重的矿山 28 处, 占带内矿山总数的 25.0%, 主要分布于康定、雅江、道孚、丹巴; 影响轻微的矿山 74 处, 占带内矿山总数的 66.07% (图 3c)。

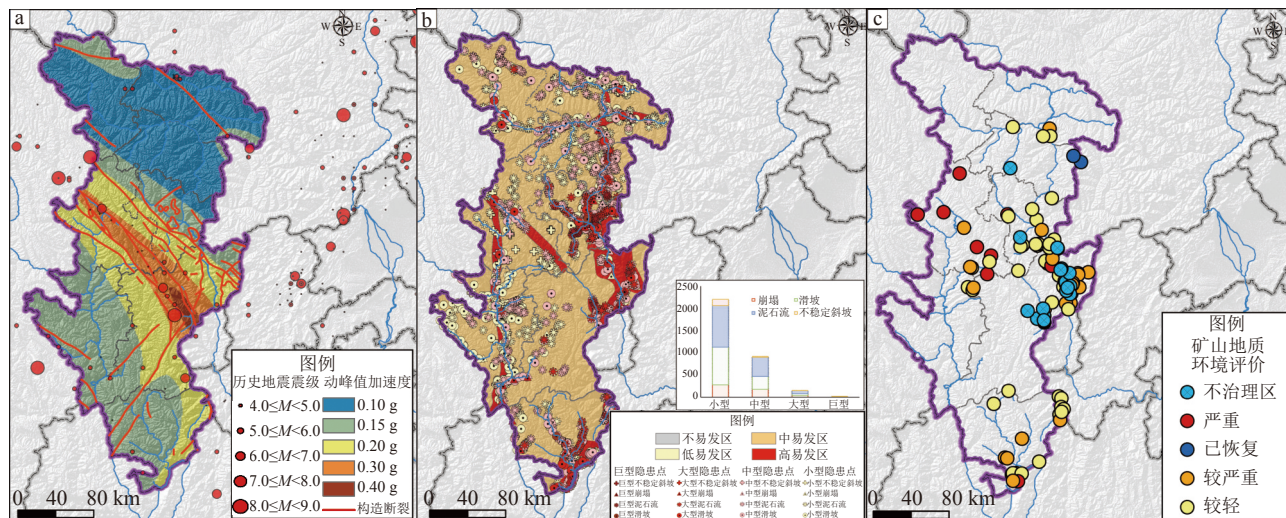


图3 川西锂矿带地震分布(a)、地质灾害分布(b)和矿山地质环境评价(c)

Fig.3 Earthquake(a), geological hazard(b) and geological environment evaluation(c)

3 生态地质环境承载力评价

环境承载力的评价方法已相对成熟, 各类型评价的核心差异在于评价目标导向不同, 进而导致评价体系设计不同^[13-14]。地质环境是生态环境的载体, 生态环境是地质环境的“屏障”, 生态地质环境强调地质环境、生态环境和社会经济三者是一个统一的动力系统^[15], 因此本次研究将评价体系划分为地质环境、生态环境和社会环境三个子系统进行评价。承载力评价的表象差异在于、数据指标获取、评价方法选择、指标权重赋值。数据精度决定了评价质量及成果的可应用性, 现行地质环境承载力分区图多呈块状, 这与实际情况有较大差异。块状分区图只是评价单元的综合表现, 并不能体现出评价单元内承载力状态的差异^[16]。本次评价全面收集、整理、制作高精度评价原始数据, 采用 AHP 层次分析法, 结合熵值法, 综合权衡主、客观赋权方法的优缺点, 运用综合权重法来确定指标的权重。

3.1 数据获取、评价方法、指标权重。

(1) 数据获取。本次研究数据包括: (1) 30 m 分辨率的 DEM 数据, Sentinel 2 影像 10 m 分辨率数据, 用于提取地形、地貌、高程、河网、土地利用、植被覆盖等数据; (2) 中国 1:500 万工程地质图、中国 1:100 万区域地质图 (I47、H47、

H48 幅), 用于工程岩组分类及地质构造矢量化; (3) 中国地震动峰值加速度数据、地质灾害隐患点数据, 用于建立灾害缓冲; (4) 锂矿资源数据、区域矿山数据, 用于建立矿点缓冲; (5) 1 公里网格 GDP 数据、人口、道路, 用于建立人类活动影响。本次评价共获取并采用了 19 项指标。

(2) 评价方法。(1) 数据标准化, 由于各个指标数据衡量标准和单位均不相同, 对数据进行标准化处理, 将其值统一在 0~1 的标度区间;

(2) 运用层次分析法结合熵值法获得各指标综合权重, 将计算结果归一化, 并统一分辨率为 30 m, 借助 Arcgis 空间叠置分析工具, 把所有指标进行加权求和制图。

(3) 指标权重。层次分析法目标层为川西锂矿带生态地质环境承载力; 准则层分别为地质环境子系统、生态环境子系统和社会经济子系统。将高程、坡度、地表切割度、地质灾害密度、地层岩性、地震动峰值加速度、断层缓冲区作为地质环境子系统的指标层; 年均降水量、年均气温、EVI、土壤可蚀性 K 值、河流缓冲、矿点缓冲、年均蒸散发量作为生态环境子系统的指标层; 将耕地面积占比、建设用地面积占比、人口密度、GDP 密度、道路缓冲作为社会经济环境子系统的指标层。不同指标对其子系统存在正向或

负向的影响，如地震动峰值加速度，值越大表示地震对地面的影响越大，地震烈度越大，生态地质环境承载力越差，与生态地质环境承载力呈负相关关系，指标正负性及其权重详见表 2。

表 2 生态地质环境承载力评价指标及其权重
Table 2 Evaluation index weighting of eco-geological environment carrying capacity

准则层	指标	正负向	层次分析法权重	熵值法权重	综合权重
地质环境子系统	断裂缓冲区	正向	0.1195	0.0656	0.0963
	地层岩性	正向	0.0269	0.0986	0.0576
	高程	负向	0.1108	0.0457	0.0828
	地表切割度	负向	0.0814	0.0461	0.0661
	坡度	负向	0.0716	0.0361	0.0563
	PGA	负向	0.0225	0.0265	0.0242
	地质灾害密度	负向	0.0578	0.0590	0.0583
	土壤可蚀性K值	负向	0.0357	0.0547	0.0439
生态环境子系统	年均降雨量	正向	0.0689	0.0384	0.0558
	年均气温	正向	0.0455	0.0453	0.0454
	年均蒸散发	正向	0.0236	0.0567	0.0379
	EVI	正向	0.1088	0.0293	0.0746
	河流缓冲区	负向	0.0163	0.0647	0.0372
	矿点缓冲区	正向	0.0131	0.0625	0.0344
社会经济子系统	耕地面积比	正向	0.0219	0.0794	0.0467
	建设面积比	正向	0.0330	0.0221	0.0283
	道路缓冲区	负向	0.0113	0.0672	0.0354
	人口密度	正向	0.0553	0.0799	0.0659
	GDP密度	正向	0.0761	0.0222	0.0529

3.2 地质环境子系统

川西锂矿带地质环境子系统承载力指数范围 0.129~0.397，集中于 0.2~0.3 之间，地质环境承载力为中等以上区域占比达到 60.61%（表 3），主要分布于金川县北部、壤塘县中东部、雅江县北部，以及零星分布于九龙县南部区域；地质环境承载力等级为较差的区域占比达到了 33.93%，主要分布与道孚县、康定市、丹巴县大部分区域，以及马尔康和壤塘北部区域（图 4）。地质环境承载力子系统呈现较为明显的分带性和自相似性，分带性体现在承载力高的区域与承载力低的区域均相对分布集中，整个川西锂矿带从北至南

总体表现为“低—高—低—高”的带状分布特征。自相似性体现在承载力较低的区域与断层缓冲低值区、地震动峰值加速高值区分布较为相似。从地质环境本底结构推测认为，断层缓冲低值区代表了带内总体地质环境受到区域性活动断裂影响较大的区域，即鲜水河断裂影响区及构造断裂集中区，该值越小，代表距断裂距离较远、岩体坚硬、地质环境稳定。川西锂矿带内地质环境背景相对稳定，地质环境承载力较好的区域分布广泛，地质环境承载力较差的区域相对集中，总体上川西锂矿带地质环境较为安全稳定。

表 3 地质环境子系统承载力信息
Table 3 Geological environment subsystem bearing capacity information

分级	<0.23	0.23~0.26	0.26-0.29	0.29~0.31	>0.31
承载力等级	承载力差	承载力较差	承载力中	承载力较高	承载力高
分布面积（km ² ）	3308.26	18610.01	19649.07	8902.39	5262.65
分布比例	5.94%	33.39%	35.26%	15.97%	9.44%

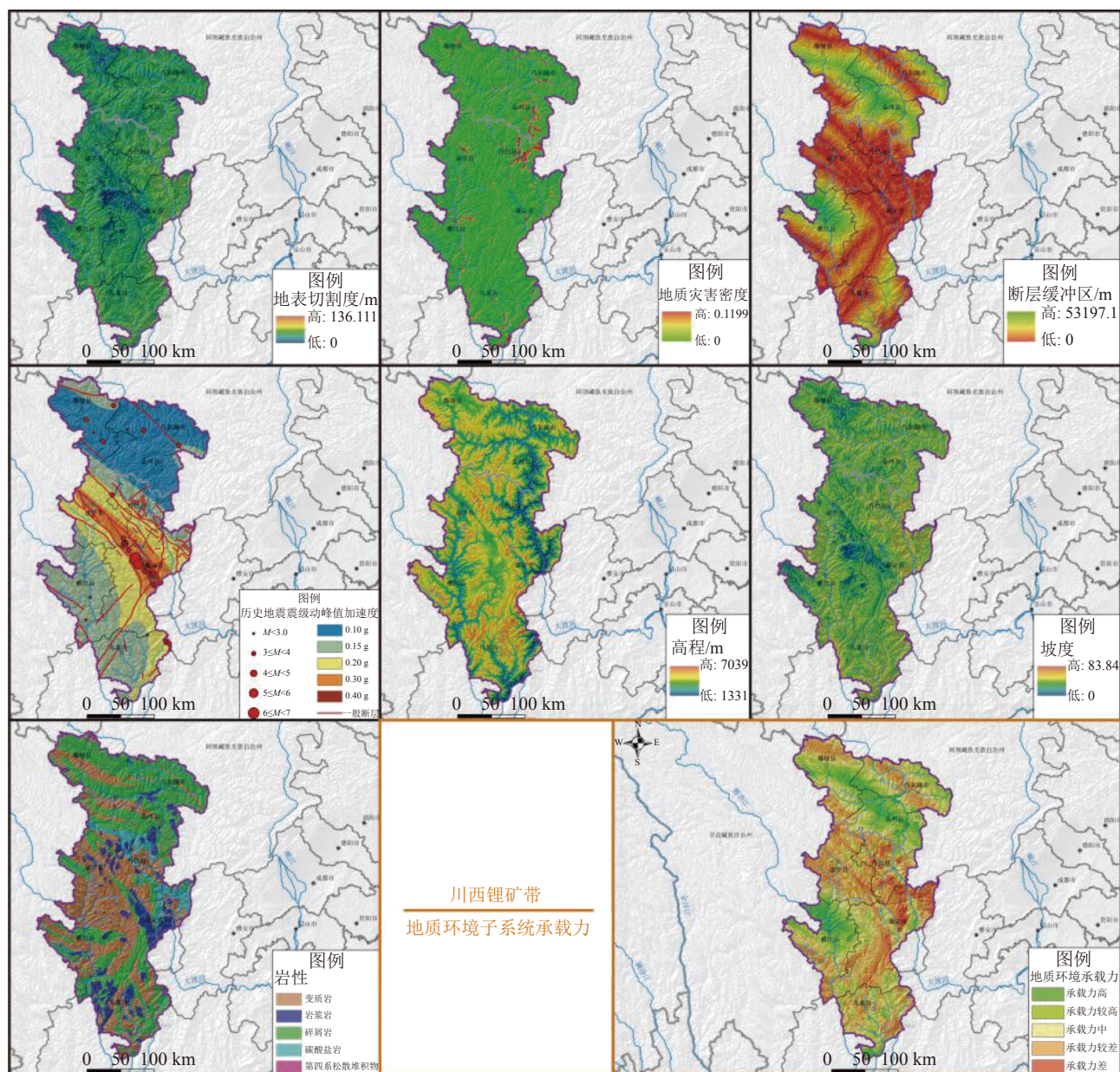


图4 地质环境子系统承载力评价结果

Fig.4 Geological environment subsystem carrying capacity evaluation

3.3 生态环境子系统

川西锂矿带生态环境子系统承载力指数范围 0.023~0.268, 主要集中于 0.15~0.2 之间, 生态承载力等级为中等的区域面积占比最大, 达到 51.19%, 中等及以上的区域比例累计达到 73.73%; 较差的占比为 17.63%; 生态承载力等级为差的占比为 8.64% (表 4), 川西锂矿带总体生态环境承载力较好。生态环境承载力较高区域呈线性分布, 多数分布于雅砻江流域、大金川流域、九龙河沿岸区域, 道孚县、金川县和九龙县北部高山

峡谷地区承载力水平较差 (图 5)。江河流域内是气温相对适宜、河网相对密集的集中区域, 气温越低越不利于植被类型的多样化, 限制的生长发育; 距矿山越近, 人类工程活动对生态环境的影响程度越大, 越不利于生态环境的稳定性。增强型植被指数 (EVI) 及土壤可蚀性 K 值分布表明, 带内主要河流流域沿岸植被较为丰富, 土壤更不易受到侵蚀, 因而整体生态环境承载力更高。矿点缓冲表明距离断矿点越近, 存在生态环境问题的可能性就越大, 带内大部分区域离矿点距离均

较远，带内矿点低缓冲与生态环境承载力差的区域吻合度不高，表明带内矿业活动对整体区域的生态环境影响作用并不显著。

表 4 生态环境子系统承载力信息
Table 4 Ecosystem subsystem carrying capacity information

分级	<0.14	0.14~0.16	0.16~0.19	0.19~0.22	>0.22
承载力等级	承载力差	承载力较差	承载力中	承载力较高	承载力高
分布面积/km ²	4826.37	9844.57	28589.92	10856.54	1737.31
分布比例	8.64%	17.63%	51.19%	19.44%	3.11%

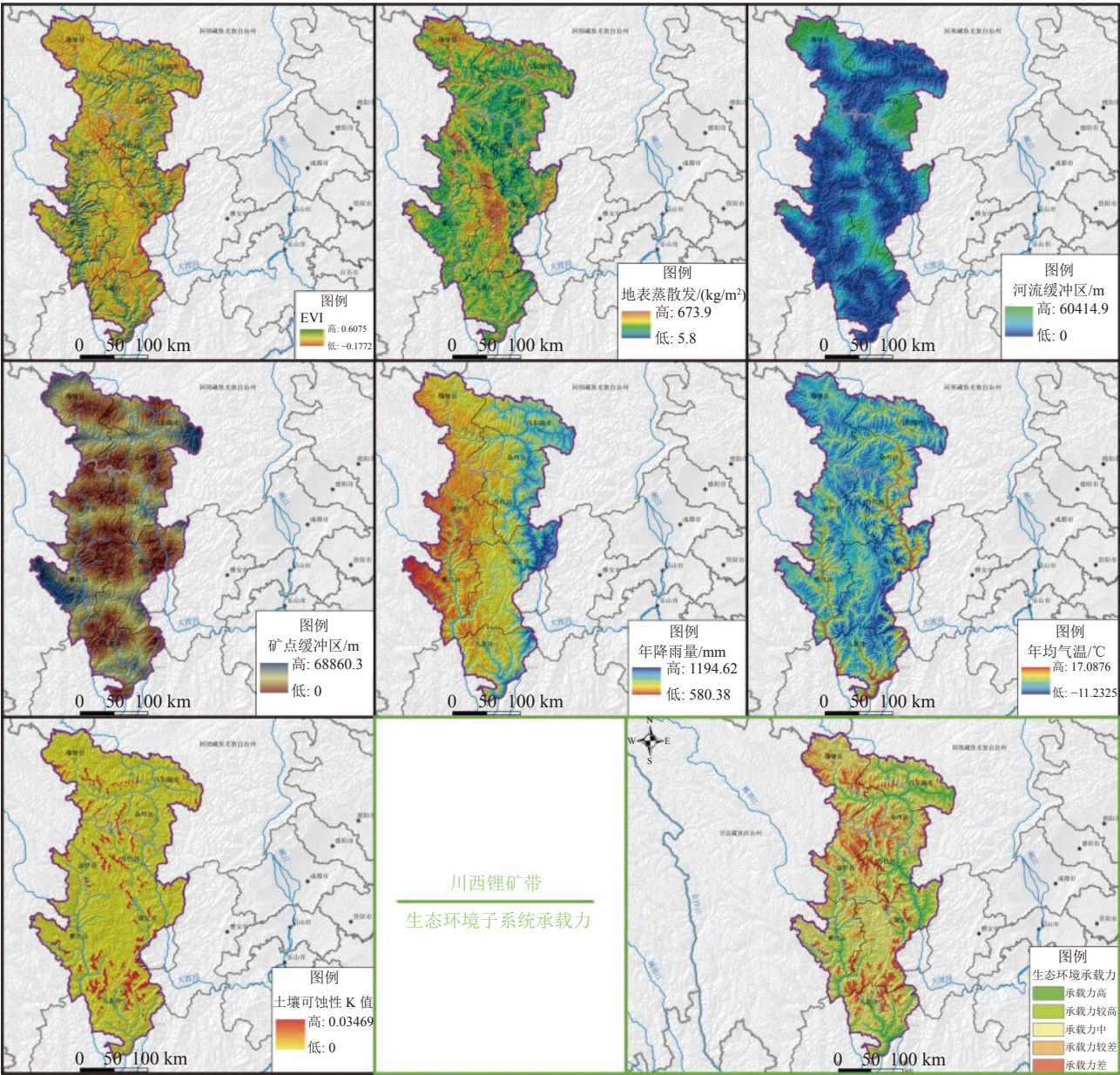


图 5 生态环境子系统承载力评价结果
Fig.5 Ecosystem subsystem carrying capacity evaluation

3.4 社会经济子系统

川西锂矿带社会经济子系统承载力指数范围

0.003~0.174，集中于 0.03~0.05 之间。社会经济承载力等级为中的面积占比最大，为 54.42%；中

等及以上累计比例达到 72.48%。社会经济承载力等级为交差和差的面积占比分别为 22.76% 和 4.76%；社会经济承载力等级为优的面积占比最小，仅为 8.59%（表 5）。总体表明川西锂矿带内社会经济程度差异较大，整体上呈现“西弱—中平—东强”的发展差异趋势。社会经济承载力等级为优的区域呈点状和小范围片状分布在东部大渡河流域一线、南部九龙河流域内交通便利的城镇中心、大渡河流域内康定市、金川县、马尔康市

等，范围内拥有更高的耕地占比、建设用地面积占比、人口密度和 GDP 密度。社会经济承载力中等的区域分布在川西锂矿带中部一线——马尔康、金川县、康定市西部、九龙县中部，主要受道路和社会经济程度较高的乡镇中心辐射作用影响。社会经济承载力较差的区域分布于川带内西部一线—雅江县、道孚县、壤塘县（图 6），为雅砻江流域高山峡谷区，地表切割度大，距道路欧氏距离较远，交通不便，人口密度小，经济水平较差。

表 5 社会经济子系统承载力信息
Table 5 Socio-economic subsystem carrying capacity information

分级	<0.027	0.027~0.035	0.035~0.044	0.044~0.051	>0.051
承载力等级	承载力差	承载力较差	承载力中	承载力较高	承载力高
分布面积/km ²	2669.93	12757.41	30509.89	8851.67	1270.16
分布比例	4.76%	22.76%	54.42%	15.79%	2.27%

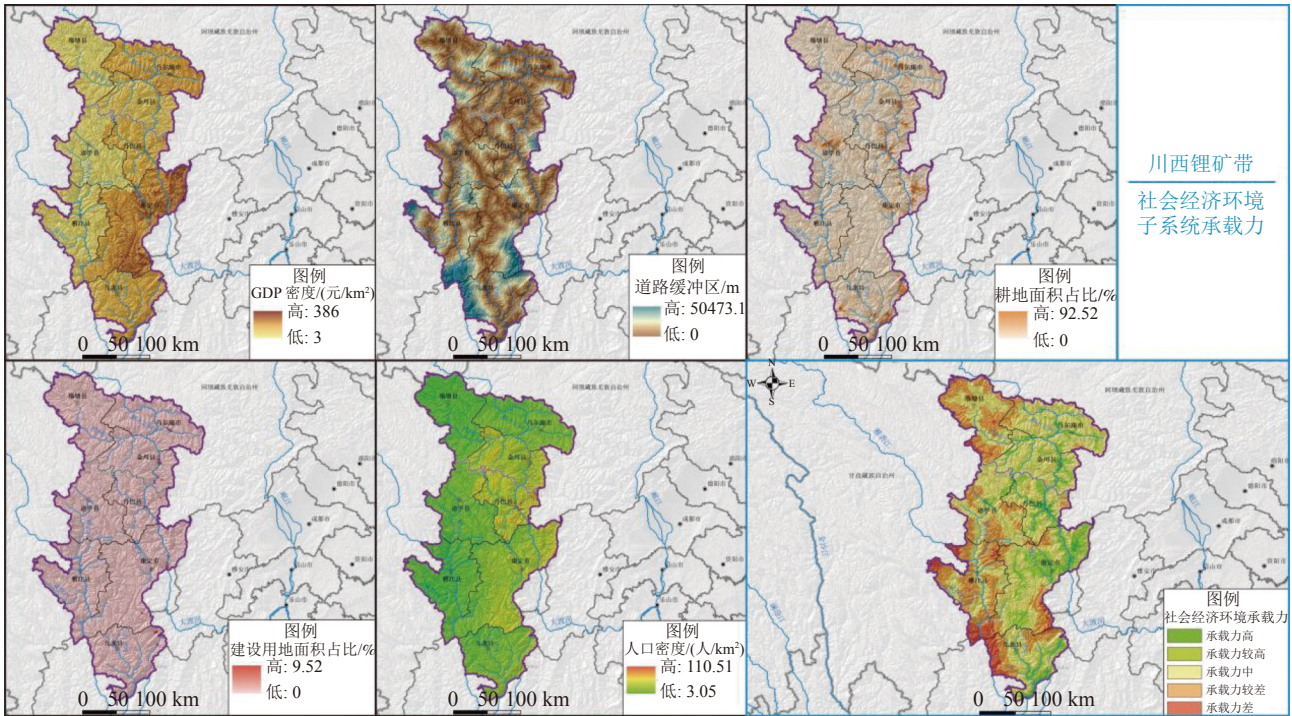


图 6 生态环境子系统承载力评价结果
Fig.6 Ecosystem subsystem carrying capacity evaluation

3.5 生态地质环境承载力综合评价

综合地质环境、生态环境、社会经济环境三个子系统评价结果，叠加计算得到综合承载力指数范围 0.29~0.73。综合承载力较高的区域在空间上总体沿河流和峡谷地带分布，相对集中于大渡河和雅砻江流域，在行政区划上主要在马尔康市、雅江县以及九龙县的南部地区，面积达到

17385.1 km²，占带内面积的 31.23%。综合承载力中等的区域面积为 26681.44 km²，接近整个川西锂矿带国土面积的二分之一，累计中等及以上综合承载力的国土面积比例达到 79.16%，表明整个川西锂矿带生态地质环境状况相对良好，环境承载韧性十足。综合承载力较差的区域分布在带内中部区域和偏远高山峡谷地区，道孚县东北部、丹

巴县西部、金川县南部地区以及九龙县的北部区域，承载力较差及以下的区域面积 9605.9 平方公

里，占研究区总面积的 17.25%（表 6，图 7）。

表 6 生态地质环境承载力综合评价信息

分级	<0.41	0.41~0.45	0.45~0.50	0.50~0.54	>0.54
承载力等级	承载力差	承载力较差	承载力中	承载力较高	承载力高
分布面积/km ²	2219.12	9386.83	26681.44	12833.58	4551.56
分布比例/%	3.99	16.86	47.93	23.05	8.18

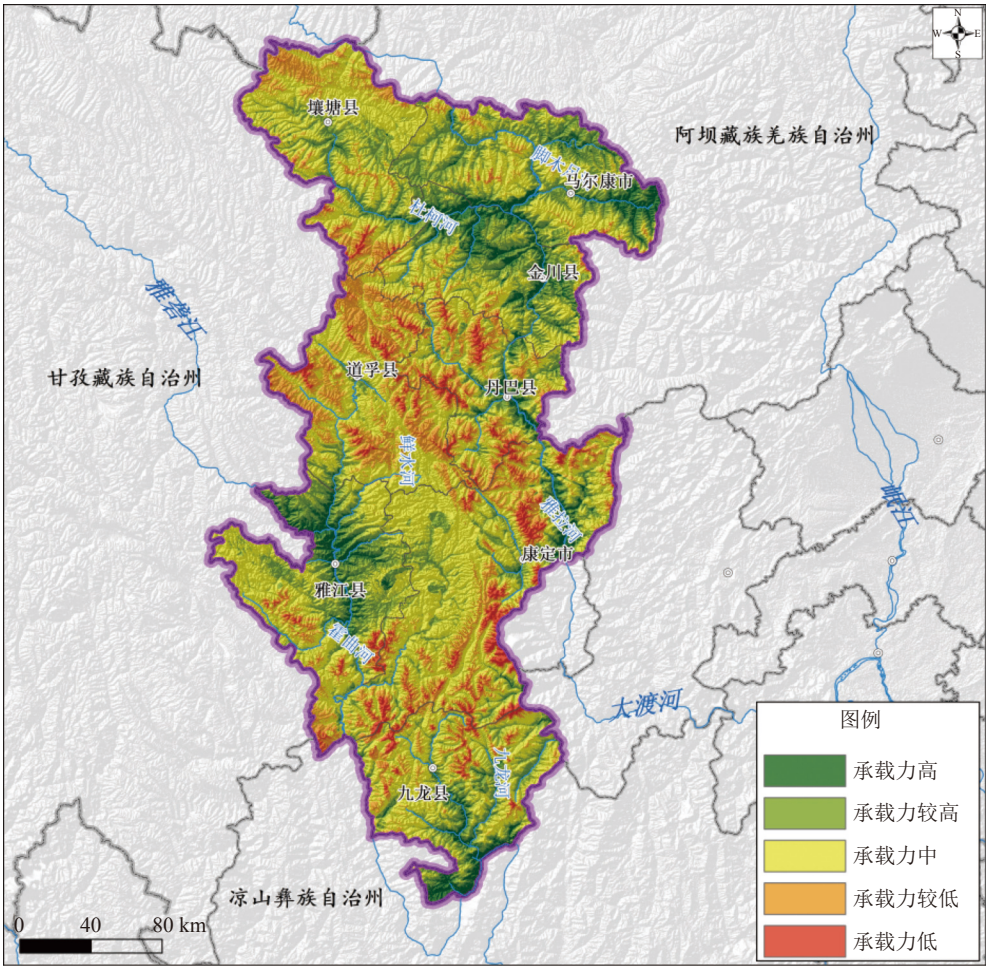


图 7 川西锂矿带生态地质环境承载力评价结果
Fig.7 Eco-geological environment carrying capacity evaluation

4 结论与建议

- (1) 川西锂矿带内资源丰富，锂矿资源相对集中分布于可尔因、甲基卡、九龙三个地区，资源量位居全国前列。带内主要存在的环境地质问题为地质灾害点多面广、地震灾害频发，矿山地质环境问题主要表现为土地压占与损毁。
- (2) 构建了基于地质环境、生态环境、社会

环境的生态地质环境承载力综合评价指标体系，评价结果显示川西锂矿带地质环境相对安全稳定，带内现有矿业活动对区域生态环境影响并不显著，人类生产生活影响范围有限。中等及以上综合承载力的国土面积比例达到 79.16%，锂矿资源集中区内生态地质环境承载力较高，川西锂矿带总体生态地质环境状况良好，环境承载韧性十足。

参考文献:

- [1] 刘丽君, 王登红, 刘喜方, 等. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. *中国地质*, 2017, 44(2):263-278.
- LIU L J, WANG D H, LIU X F, et al. Main types, distribution characteristics and current status of exploration and development of lithium ores at home and abroad[J]. *Geology in China*, 2017, 44(2):263-278.
- [2] 王登红, 刘善宝, 于扬, 等. 川西大型战略性新兴产业矿产基地勘查进展及其开发利用研究[J]. *地质学报*, 2019, 93(6):1444-1453.
- WANG D H, LIU S B, YU Y, et al. Progress of exploration of large strategic emerging industry mineral base in West Sichuan and its development and utilization[J]. *Journal of Geology*, 2019, 93(6):1444-1453.
- [3] 罗丽萍, 胡军亮, 谭洪旗, 等. 川西上基拱伟晶岩型铍矿绿柱石矿物化学特征[J]. *矿产综合利用*, 2021(5):113-119.
- LUO L P, HU J L, TAN H Q, et al. Mineralogical characteristics of the pegmatite type beryl in Shangjigong, Western Sichuan Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(5):113-119.
- [4] 谭洪旗, 朱志敏, 周雄, 等. 川西九龙地区两期伟晶岩型稀有金属成矿作用[J]. *矿产综合利用*, 2022(1):15-24.
- TAN H Q, ZHU Z M, ZHOU X, et al. Two periods rare metal mineralization of the pegmatite in Jiulong Area, Western Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1):15-24.
- [5] 赖杨, 田恩源, 龚大兴, 等. 川西斯跃武锂-铌-钽稀有金属矿集区自然重砂异常特征[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):65-70.
- LAI Y, TIAN E Y, GONG D X, et al. Natural heavy mineral anomaly characteristics and ore potential analysis of the Siyuewu Li-Nb-Ta rare metals ore-concentrated area in western Sichuan province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):65-70.
- [6] 周雄, 周玉, 谭洪旗, 等. 四川措拉锂多金属矿的矿物学特征研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):142-147.
- ZHOU X, ZHOU Y, TAN H Q, et al. Mineralogical study on Cuola lithium polymetallic mining area, western Jijika, Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):142-147.
- [7] 王越, 王婧, 李潇雨, 等. 川西某金矿工艺矿物学研究及对选矿工艺的影响[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):206-210.
- WANG Y, WANG J, LI X Y, et al. Process mineralogy study of the gold deposit in western Sichuan area and its influence on mineral processing technology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):206-210.
- [8] 赵银兵, 何政伟, 倪忠云, 等. 矿产资源开发的生态地质环境风险研究——以甘孜州东部为例[J]. *地球与环境*, 2010, 38(2):207-213.
- ZHAO Y B, HE Z W, NI Z Y, et al. Study on the ecological geological and environmental risks of mineral resources development-Eastern Ganzi Prefecture as an example[J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(2):207-213.
- [9] 赵银兵, 何政伟, 倪忠云, 等. 四川省甘孜州东部生态地质环境质量研究[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(8):1033-1038.
- ZHAO Y B, HE Z W, NI Z Y, et al. Study on the quality of ecological and geological environment in eastern Ganzi Prefecture, Sichuan Province[J]. *Environmental Science Research*, 2010, 23(8):1033-1038.
- [10] 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 Y B, NI Z Y, OUYANG Y, et al. Advances in ecological geological environmental carrying capacity research[J]. *Sedimentary and Tethys Geology*, 2022, 42(4):529-541.
- [11] 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J]. *地质力学学报*, 2022, 28(5):743-764.
- WANG D H, DAI H Z, LIU S B, et al. New trends in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China over the past decade[J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(5):743-764.
- [12] 付小方, 梁斌, 邹付戈, 等. 川西甲基卡锂等稀有多金属矿田成矿地质特征与成因分析[J]. *地质学报*, 2021, 95(10):3054-3068.
- FU X F, LIANG B, ZOU F G, et al. Geological characteristics and genesis of rare polymetallic fields such as lithium in Jiajika, West Sichuan[J]. *Journal of Geology*, 2021, 95(10):3054-3068.
- [13] 王欣, 赵其华, 张朝俊, 等. 基于组合权重的金阳县生态地质环境承载力评价[J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(6):29-35.
- WANG X, ZHAO Q H, ZHANG C J, et al. Evaluation of ecological and geological environment carrying capacity of Jinyang County based on combined weights[J]. *Journal of Water Resources and Construction Engineering*, 2019, 17(6):29-35.
- [14] 张元培, 司可夫, 吴颖, 等. 鹤峰县地质环境承载力评价研究[J]. *资源环境与工程*, 2020, 34(z1):50-55.
- ZHANG Y P, SI K F, WU Y, et al. Study on the evaluation of the carrying capacity of geological environment in Hefeng County[J]. *Resource Environment and Engineering*, 2020, 34(z1):50-55.
- [15] 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 Z Q, LI R M, LI X L, et al. Progress and development direction of research on the environmental carrying capacity of geological resources[J]. *Geology in China*, 2018, 45(6):1103-1115.
- [16] 王念秦, 李仁伟, 蒲凯超, 等. 中国地质环境承载力评价研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(1):150-155.
- WANG N Q, LI R W, PU K C, et al. Research progress of geological environment carrying capacity evaluation in China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 42(1):150-155.

(下转第 173 页)

Comprehensive Utilization of Sulfur Separation Tailings of High Sulfur Rare Metal Complex Ore in Coal Measure

Feng Xueru, Liu Shuping, Li Chao

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Sichuan Rare Earth Technology Innovation Center, Applied Technology Innovation Center of Rare Earth Resources of Chinese Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: This is an essay in the field of metallurgical engineering. Comprehensive utilization of sulfur separation tailings from a coal measure high sulfur rare metal complex ore in Chongqing area was studied, which provided a feasible basis for the recovery of valuable elements such as aluminum, silicon, rare earth and niobium. The experimental results show that the optimum leaching conditions are as follows: sulfuric acid concentration 70%, leaching time 3 h, leaching liquid to solid ratio 3, leaching temperature ≥ 135 °C. Under these conditions, the Al_2O_3 leaching rate can reach 87.25%. Acid leaching solution can be used to prepare aluminum sulfate as a water treatment agent. SiO_2 can be obtained from acid leaching residue after enrichment of valuable elements such as silicon, rare earth and niobium by NaOH leaching. The content of more than 85 g/L alkali leaching solution, used for the preparation of sodium silicate products; After enrichment of rare earth and niobium elements, the content of TREO and Nb in alkali leaching residue is 1820 g/t and 274 g/t, which can be used as raw materials for the recovery of rare earth and niobium elements.

Keywords: Metallurgical engineering; Sulfur tailings; Comprehensive utilization; Leaching; Aluminum sulfate; Enrichment

////////////////////////////////////
(上接第 168 页)

Eco-Geological Environment Carrying Capacity and Resource and Environmental Characteristics of Lithium Ore Belt in Western Sichuan

Dai Li, Tan Hongqi, Zhou Xiong

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Technical Centre for Mine Ecological Protection and Rehabilitation (Western China), CAGS, Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Minerals Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: This is an essay in the field of earth sciences. The lithium belt in West Sichuan is the richest area of hard rock lithium resources in China, but the ecological and geological environment in the belt is fragile, so the coordinated development of resources, environment and economy has been a difficult problem for the deep development of regional resources. This paper systematically compares the natural resources, mineral resources, geological environment characteristics and the main environmental geological problems in the lithium belt, constructs an ecological and geological environment carrying capacity evaluation index system based on three subsystems: geological environment, ecological environment and social environment, selects and obtains 19 basic evaluation index data information, and carries out a region-wide carrying capacity evaluation. The results show that: the geological environment of the west Sichuan lithium belt is relatively safe and stable, the existing mining activities in the belt do not have a significant impact on the regional ecological environment, and the impact of human production and life is limited in scope. The proportion of the country area with medium and above carrying capacity reaches 79.16%, the ecological and geological environment carrying capacity in the lithium resource concentration area is high, and the overall ecological and geological environment is in good condition.

Keywords: Earth sciences; Lithium belt in Western Sichuan; Eco-geological environment carrying capacity; Lithium resources; Environmental geology