

doi: 10.12029/gc20200601

王京彬, 卫晓锋, 张会琼, 甘凤伟. 2020. 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, 47(6): 1611–1624.

Wang Jingbing, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Gan Fengwei. 2020. 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]. Geology in China, 47(6): 1611–1624(in Chinese with English abstract).

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

王京彬^{1,2}, 卫晓锋¹, 张会琼¹, 甘凤伟¹

(1. 北京矿产地质研究院, 北京 100012; 2. 中国地质调查局矿产资源绿色评价中心, 北京 100012)

摘要: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。通过“承德市国家生态文明示范区综合地质调查”项目的实践,探索总结出一套适合山区、基于地质建造的生态地质调查思路和技术方法框架。按照全域背景(基准)调查—重点小流域调查—生态关键带解剖3个层次开展工作,逐步深化对承德市生态地质特征和作用规律的认知。通过全域1:25万地质建造分析与编(填)图,查明生态地质背景,划分生态地质单元,快速筛选生态资源优势区和生态环境问题区;针对筛选出的生态资源优势区和生态环境问题区,开展以小流域为单元的重点区1:5万调查,以查明优势资源特征,评价生态环境风险;开展重要地质建造典型生态关键带1:1万调查与研究,揭示生态地质系统三维结构特征和相互作用机理,为综合监测和生态系统演变趋势预测提供依据。构建了生态地质调查“需求—调查—转化”体系框架,依据生态地质调查成果,为承德市国土空间规划、生态产业发展和生态保护修复,提出了相应的地学建议。

关键词:生态地质调查;地质建造;小流域;生态关键带;承德市;河北省

中图分类号:X141 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2020)06-1611-14

The eco-geological survey based on geological formation, exemplified by integrated geological survey of National Ecological Civilization Demonstration Area in Chengde City, Hebei Province

WANG Jingbing^{1,2}, WEI Xiaofeng¹, ZHANG Huiqiong¹, GAN Fengwei¹

(1. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China; 2. Research Center for Green Evaluation of Mineral Resources, CGS, Beijing 100012, China)

Abstract: Eco-geology is a science that studies the interaction between ecology and geological environment and its mechanism. The technical frameworks for eco-geological surveys based on geological formation for mountainous areas are summarized, through the project of "Comprehensive Geological Survey of National Ecological Civilization Demonstration Area in Chengde City". According to the three levels of survey, i.e., background (baseline) survey—small watershed survey—research on ecological

收稿日期:2020-06-29;改回日期:2020-09-28

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160229-01, DD20190822)资助。

作者简介:王京彬,男,1961年生,教授级高级工程师,主要从事矿产地质勘查和生态地质研究工作;E-mail: 13701350195@139.com。

critical zone, the eco-geological characteristics and function rules of Chengde City are gradually deepened. The survey at the 1:250000 scale can quickly identify the eco-geological background (baseline) of the whole area, recognize the eco-geological units, and quickly screen the eco-geological targets (dominant ecological resource areas and ecological environment risk areas) through the geological formation analysis and mapping; the survey with a key small watershed unit (at the scale of 1:50,000) is carried out for the selected target areas so as to identify the characteristics of dominant resources and evaluate the risks of ecological environment; surveys and researches on ecological critical zones of typical geological formation (at the scale of 1:10000) are carried out to reveal the three-dimensional characteristics and interaction mechanism of the eco-geological system and provide a basis for comprehensive monitoring and prediction of the evolution trend. The framework of "Demand-Survey-Application" is demonstrated based on the survey results, and corresponding suggestions are proposed for the land spatial planning, ecological industry development and ecological protection and restoration for Chengde City.

Key words: eco-geology survey; geological formation; small watershed; ecological critical zone; Chengde City; Hebei Province

About the first author: WANG Jingbing, male, born in 1961, professor, mainly engages in the investigation and study of mineral resources and eco-geology; E-mail: 13701350195@139.com.

Fund support: Supported by the Project of China Geological Survey (No. DD20160229-01, No. DD20190822).

1 引 言

生态文明建设是事关中华民族永续发展的千年大计,对地质调查工作提出了新需求和新要求(李金发,2014)。近地表圈层是人类活动与生态-地质环境相互作用最直接、最显著的地域,对于调节自然生境、支撑经济发展、提供生态服务等具有至关重要的作用(杨建锋等,2014)。生态文明建设和自然资源综合管理,迫切需要加深对浅表生态-地质作用过程的认识理解和生态地质调查工作的科学支撑。

为更好地支撑生态文明建设和京津冀协同发展战略,探索总结一套区域(国家生态文明建设示范区)生态地质调查技术方法和成果转化服务模式,2016年北京矿产地质研究院提出了《承德市国家生态文明示范区综合地质调查》的立项建议。2017年中国地质调查局首次在承德部署了地市级行政单元的生态地质调查示范项目,以支撑服务“生态承德”建设,并与南部的“透明雄安”城市地质调查示范相呼应,共同打造地质工作服务生态文明建设的新样板。在借鉴前人对生态地质调查研究成果的基础上(李廷栋,1999;黄润秋,2001;何政伟,2003; Trofimov et al.,2010;石建省等,2019),通过2017—2018年的探索实践,首次将地质建造分析方法引入生态地质调查中,初步构建了一套适合山区的“地质建造分析—小流域综合调查—生态关键带解剖”的生态地质调查技术方法框架,探索了不同

尺度工作方法衔接和对承德市国土空间划、生态产业发展和生态保护修复等的成果转化服务方式。

本文初步总结了“承德市国家生态文明示范区综合地质调查”项目取得的阶段性成果,重点介绍了基于地质建造的生态地质调查思路和技术方法,以期对类似地区的生态地质调查有所借鉴,并与相关专家学者探讨交流,共同推动生态地质调查和生态地质学的发展。

2 承德市生态地质背景及发展需求

承德市位于河北省东北部,面积 $3.95 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1a)。大地构造位置属于华北陆块北缘,地处内蒙古高原(蒙古高原)和华北平原的过渡地带,独特的地质构造格局,塑造了承德市独具特色的地形地貌景观特征(马收先等,2011)(图1b)。地势自北向南呈台阶式降低,其围场—赤峰断裂以北的坝上地区,属内蒙古高原的东南边缘;承德市中南部主体则为燕山山脉的中低山区,海拔200~1200 m,平均海拔350 m,最高峰雾灵山2118 m,山脉纵横,河流交错,主要的岩性岩相分布具有一定空间规律(图1c)。全年四季分明、雨热同期、昼夜温差大,属于寒温带、半干旱向半湿润过渡的大陆性季风型气候。

承德市各类生态地质资源丰富。潮河、滦河、辽河、大凌河四大水系水量充沛,年均产水量达 $37.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,是京津重要的水源地;林草资源丰富,天然草场面积 8000 km^2 ,植被类型多样,森林覆盖率达到56.7%,有“华北绿肺”之称,生态环境优良;土

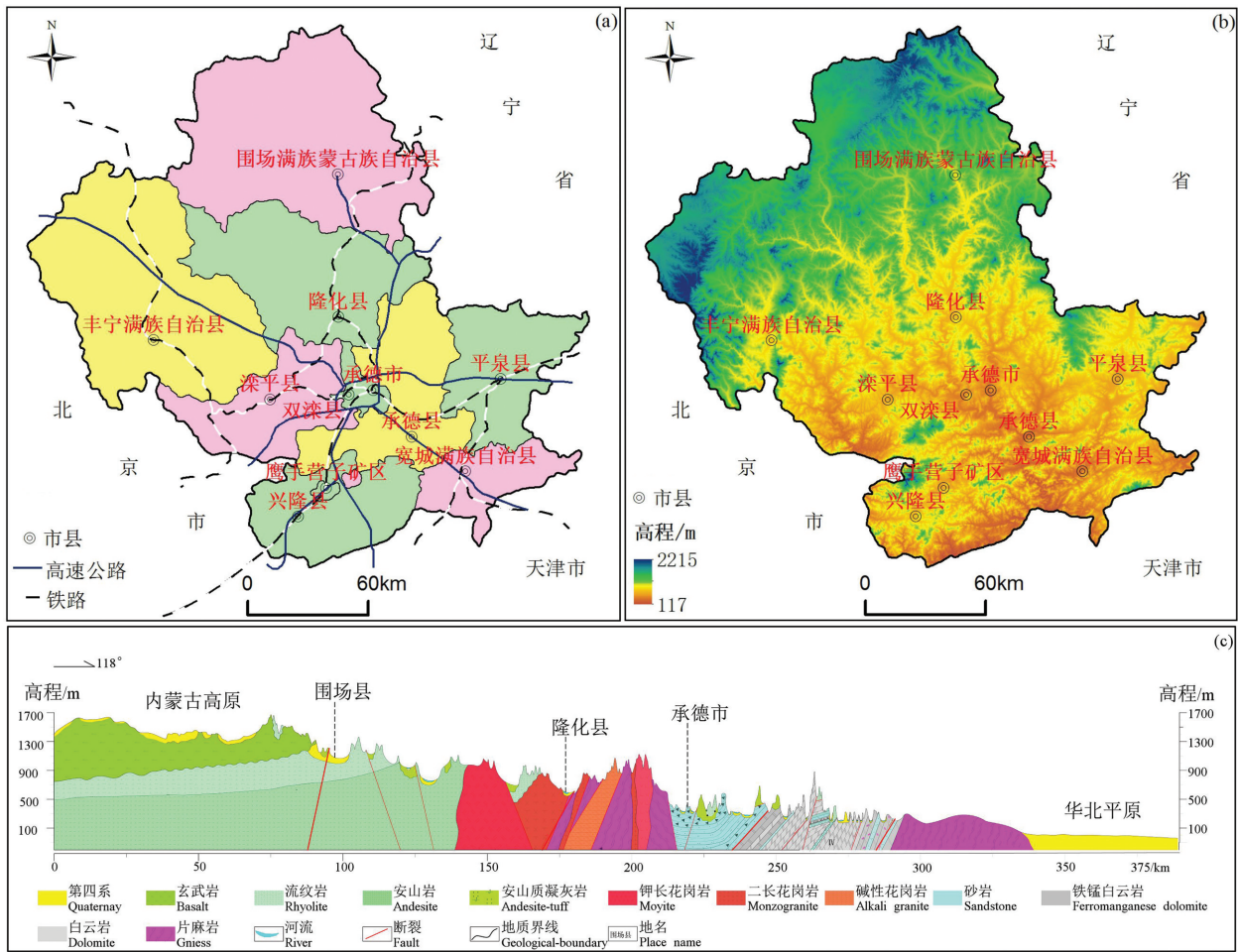


图1 承德市交通位置图(a)、地形地貌图(b)和高原—平原过渡带的生态地质背景剖面(c)

Fig.1 Traffic location map (a), topography map (b), eco-geological background profile of plateau-plain transition zone in Chengde City

地资源丰富,是京津冀地区重要的农业、蔬菜和水果基地,纳入首都菜篮子体系;矿产资源丰富,是全国第二大钒钛磁铁矿生产基地;地热资源发育(古称热河)和矿(山)泉水资源丰富,地质遗迹-生态旅游资源丰富多样。

随着承德市2014年列入国家首批生态文明先行示范区,产业发展方式急需转型升级。矿业曾是承德市的支柱产业,占全市财政总收入的36%(2010年统计),伴随大量矿山的关闭,矿业支柱产业地位下降,迫切需要生态产业发展来支撑;承德市“八山一水一分田”的自然地理格局,也面临着耕地资源不足、局部环境污染、地质灾害发育等制约生态文明建设的环境问题;承德所属8县3区中有5个贫困县,属于“环首都贫困攻坚区”,脱贫攻坚任务艰巨。承德市“十三五”规划确立了“京津冀水源

涵养功能区、国家绿色发展先行区、环首都扶贫攻坚示范区和国际旅游城市”的“三区一市”的发展定位,提出坚守生态保护和经济发展“两条底线”,走转型升级、绿色崛起之路。因此,承德市需要摸清生态地质条件特征,查明优势自然资源和生态地质环境问题分布规律,研究生态系统与地质环境作用机理,为资源利用和环境保护提供科学支撑。

结合地质-生态特点和公益性地质调查工作要求,围绕生态农业发展、生态保护与水产业发展、防灾减灾和绿色矿业发展、国际旅游城市建设等四个发展需求,提出全域背景调查(建造分析)、小流域重点调查(土地质量、水文地质、矿山环境、地质遗迹4项综合调查)和生态关键带结构特征调查3个层次工作,统筹部署,多学科交叉融合,提供地球系统解决方案,助力承德绿色发展。

3 生态地质调查技术框架

人们对生态地质的内涵尚有不同的理解。据 DD2019-09生态地质调查技术要求(1:50000)(试行),生态地质(eco-geology)主要研究各种生态问题或生态过程的地质学机理、地质作用过程及背景条件。本文把生态地质理解为生态地质(学),是研究生态与地质环境相互关系及作用机理的科学。承德生态地质调查以生态地质学基本原理为指导,按照全域背景(基准)调查—小流域重点调查—生态关键带解剖3个层次开展工作,从不同尺度深化生态-地质特征和作用过程的认知,为综合动态监测和生态系统演变趋势预测提供依据(图2)。全域生态地质背景调查,采用1:25万比例尺,摸清地质环境条件和梳理生态格局特点,划分生态地质单元,快速筛选优势特色自然资源和突出生态环境问题集中分布区域;小流域重点调查,采用1:5万比例尺,重点查明优势自然资源的禀赋特征和生态环境的问题特点,评价资源的利用方式和生态环境风险;生态关键带调查,参照1:1万比例尺,围绕重要生态地质单元和资源、环境问题集中区,通过面上详细调查和垂向关键带剖面解剖,揭示生态-地质作用机理和演化过程。

3.1 全域生态地质背景调查

工作方法采用地质建造分析方法,编调结合、以编为主,补充少量野外路线调查,编制承德市地质建造图(1:25万)。开展基于地质建造的多要素套合分析,划分生态地质单元,揭示各生态地质单元的基准特征。

3.1.1 地质建造分析原理

地质建造(Geological formation)泛指在地壳发展的某一构造阶段中,在一定的大地构造条件下所

产生的具有成因联系的一套岩石的共生组合(引自地质百科)。传统的地质建造分析多应用于大地构造和成矿作用研究,重点关注基岩区。生态地质调查对象是一定的自然空间内生态与浅表地质环境构成的统一整体——生态地质系统,包括了第四纪沉积、风化壳和风化基岩在内的岩石圈表层系统,是岩-水-土-气-生相互作用带(Goldhaber et al., 2014)。

地质环境变化必然会影响生态系统,生态系统也反作用于地质环境。生态地质环境的形成始于地表岩石的风化成土演化,因此,从生态地质的角度看,地质建造可理解为土壤形成初始阶段具有成因联系、物质组成和结构构造特征相似的一套岩石共生组合。地质建造是地质环境的物质载体,不同的地质建造类型(如碳酸盐岩建造和花岗岩建造),其土壤地球化学、地貌景观(地质遗迹)、工程岩组、水文地质等基准(baseline)特征和发育规律明显不同,而同类建造则具有相似的地质环境基准特征(Hahm et al.,2014; Lukasz et al.,2016)。地质建造对地质环境的影响主要体现在3个方面:①对地质灾害和地形地貌的影响:在区域地质构造和外动力地质作用下,不同地质建造形成不同的地貌景观特征,其致灾潜力和致灾规律也不同,影响着区内植被和动物区系的变化及生境条件;②对水文地质条件约束:不同地质建造,含水岩组结构构造和介质性质不同,相应区域的地表水-地下水循环规律和水文地球化学性质也不同。在大气降水—地下水—土壤水(毛细管孔隙水)—生态水供需转化平衡过程中,影响生态系统的质量;③直接影响土壤地球化学特性:与平原区不同,类似承德这样的中低山区,土壤多是当地基岩就近风化而成的,不同地质建造的物质组成、结构构造不同,其风化壳和土

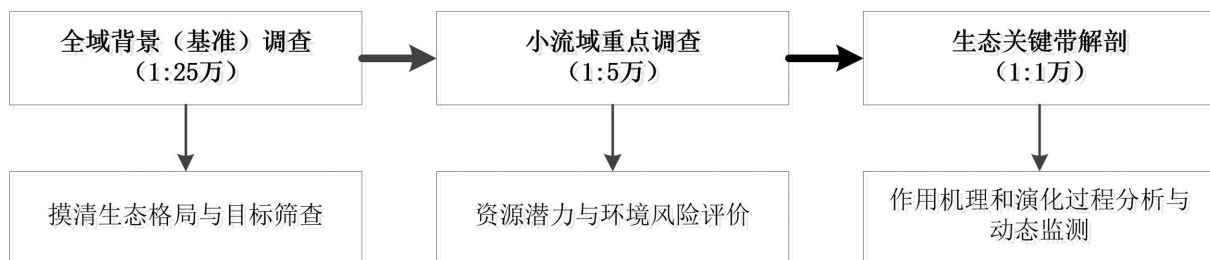


图2 承德市生态地质调查3个层次的部署框架图

Fig.2 Deployment framework on three levels of eco-geological survey, Chengde City

壤的元素组成具有较大的差异性,如由花岗岩类风化而成的土壤和碳酸盐岩风化土壤的元素地球化学特征明显不同,并发育由高背景元素的基岩建造(母质层)→高背景土壤→高背景生态(生物)的自然传导链。

对花岗岩类、片麻岩类、碳酸盐岩、砂砾岩等不同建造类型,从有机质层(A)→沉淀层(B)→母质层(C)→基岩层(R)的系统取样分析表明,土壤成分与下伏基岩建造(成土母岩)具有组分特征的一致性(图3):①不同风化层的元素分布模式与下伏基岩建造分布模式基本一致,显示风化过程中元素的分异不明显,元素相对含量的变化也不大,表现出明显的一致性,佐证了山区土壤多是由岩石建造就近风化而成的认识。②土壤继承了成土母质的元素组成特征:如,K在花岗岩类建造中含量较高,Mg、P、Fe、B元素在片麻岩类建造中含量较高,Ca元素在碳酸盐岩建造中含量较高,Mo在片麻岩和花岗岩建造中含量较高,Cu、Mn在玄武岩、片麻岩建造中含量较高(孙向阳,2005)。③风化成土过程中,随着物理化学条件(pH和Eh)的改变,不同建造元素释出能力和迁聚特性不同。例如,片麻岩建造的风化土壤多呈酸性,有利于铜、锰元素的溶出,而碳酸盐岩建造土壤多呈碱性,限制元素的溶出(牟

保磊,1999)。

在一定气候带或者相近的气候条件内,地质建造会直接影响了生态系统发育的水土条件、地形地貌形成以及破坏性的致灾条件(Hahm et al 2018),是决定山水林田湖草湿生态系统的基础因素之一。虽然岩石风化是土壤影响的开始,但土壤形成包括“地质大循环”和“生物小循环”两个阶段,通过分析地质建造(成土母岩)的化学成分可以预测土壤的营养含量尤其是微量元素的含量变化特征(土壤元素本底),如基岩建造中富硒或富锗,可以推测其相应的土壤中具有富硒或富锗元素的潜力,但土壤的“微生物小循环”阶段会影响元素有效态等形态和利用效率发生变化。因此,可以利用过去以找矿为目标的地球化学扫面资料,来间接推断土壤(风化层)地球化学特征,为生态地质区划提供地球化学依据,尤其是地球化学元素总量特征。

3.1.2 地质建造编图

传统地质建造按岩石成因类型,划分为沉积建造、岩浆建造和变质建造。考虑到生态系统发育与第四纪地质作用所形成的松散沉积物分布区密切相关,因此,本次工作把第四纪沉积物称为“堆积建造”,在生态地质调查中将地质建造拓展为沉积建造、岩浆建造、变质建造和堆积建造4大类。

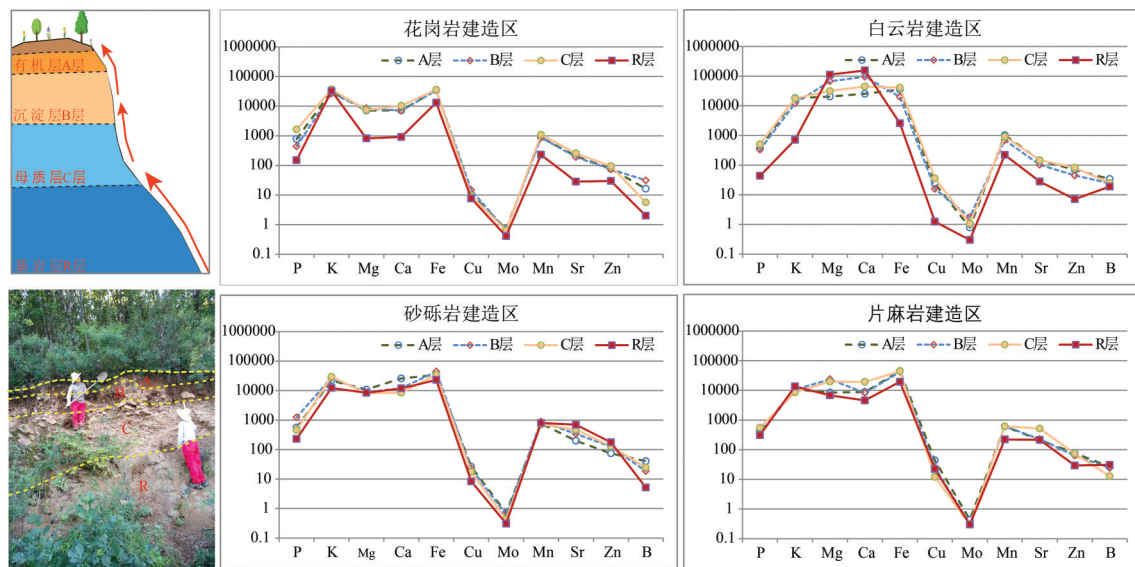


图3 不同建造中基岩—风化层—土壤层植物营养元素(10⁻⁶)分布特征

A—有机质层;B—沉积层;C—母质层;R—基岩层

Fig.3 Distribution patterns of plant nutrient elements (10⁻⁶) in bedrock-weathered layer-soil layer in different geological formations

A—Organic;B—Deposition;C—Parent;R—Bedrock

以找矿预测为目标的地质建造分析,突出形成时代和岩石组合。在生态地质调查研究中,则更突出岩石组合,把不同时代相同成因、物质组成和结构构造相似的岩石,归并为同一类地质建造。以承德地区1:20万和部分1:5万区域地质调查资料为基础,合并相似的岩石单元,采用“建造—亚建造—岩石类型”3级分类体系,划分了堆积建造(河湖相亚建造、风成相亚建造)、碳酸盐岩建造(灰岩、白云岩亚建造)、碎屑岩建造(砂岩、泥质岩亚建造)、花岗岩类建造、火山岩建造(长英质、安山-玄武质亚建造)、片岩-片麻岩建造(片岩亚建造、片麻岩亚建造)等6大类地质建造及其重要的亚建造,编制了承德市1:25万地质建造图(图4),图面中主要呈现浅表层的岩性岩相,基于岩层产状和地形地貌特征确定,水平(缓倾)产状选择顶部岩层,陡倾岩层选择厚度较大岩层,岩体选择近地表的主要岩性岩相,变质岩选择主要变质岩相,特殊岩层单独分列。

3.1.3 多要素套合分析及生态地质单元划分

多要素套合分析。依据区域1:20万化探扫面成果资料,编制了承德市元素地球化学系列图(1:25

万),与地质建造图套合分析显示,地质建造分区与元素地球化学异常带有良好的对应关系(图5)。相应的地质建造与地形地貌图、土壤类型图、环境地质(地质灾害)图、地表植被图等的套合分析,也显示出了较好的相关性和规律性(图6)。因此,本次运用自然综合体多属性叠加方法(杨占君等,2008)进行多要素分析,第一层是气候带的分区,第二层以1:25万地质建造图+区域地球化学图为地质背景图层,第三层套合地貌、土壤类型、水文(流域)地质、环境地质等的带性地质环境图层,第四层植被类型、人类活动等生态要素图层。

划分生态地质单元。基于地质建造图及多要素套合分析显示的对应关系和规律性,进行生态地质单元划分。将承德市自北而南划分为5个生态地质单元(区):I北部围场(坝上)高原边缘区、II中北部丰宁—隆化冀北山区、III中部滦平—承德盆地区、IV中南部宽城—兴隆燕山山脉区、V南部孤山子—峪耳崖燕山南麓区等17个生态地质亚区和数个生态地质单元类型,揭示了各生态地质单元的地质建造、元素地球化学、地形地貌、土壤类型、适宜

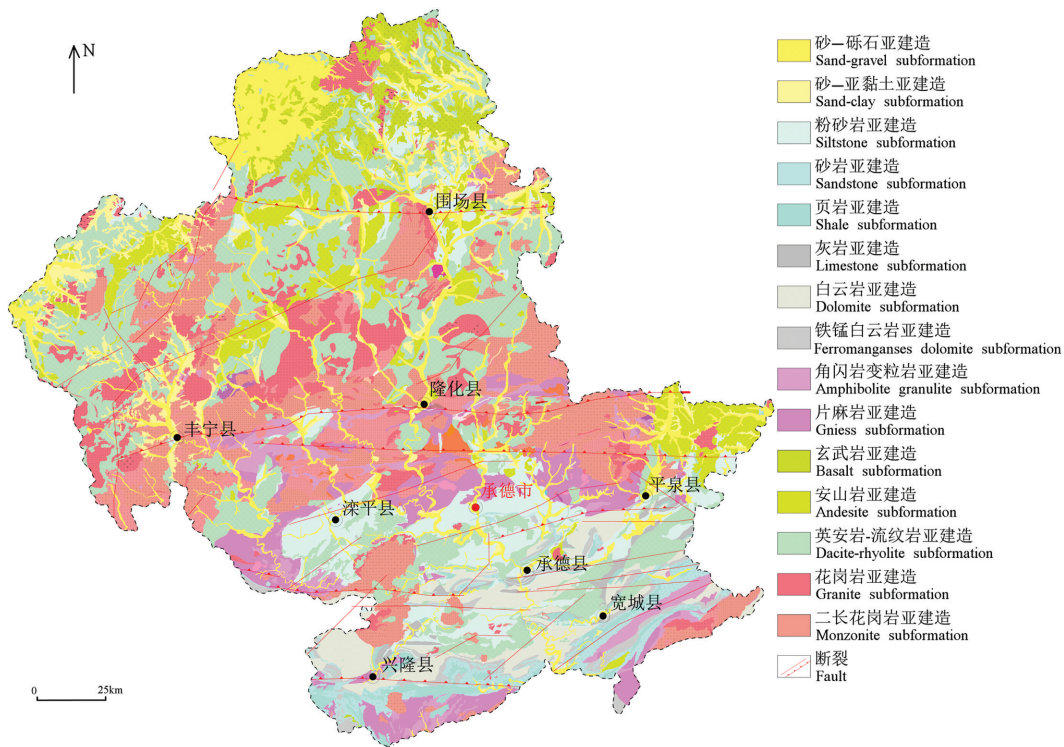


图4 承德市地质建造图(1:250000)

Fig.4 Geological formation map of Chengde City (1:250000)

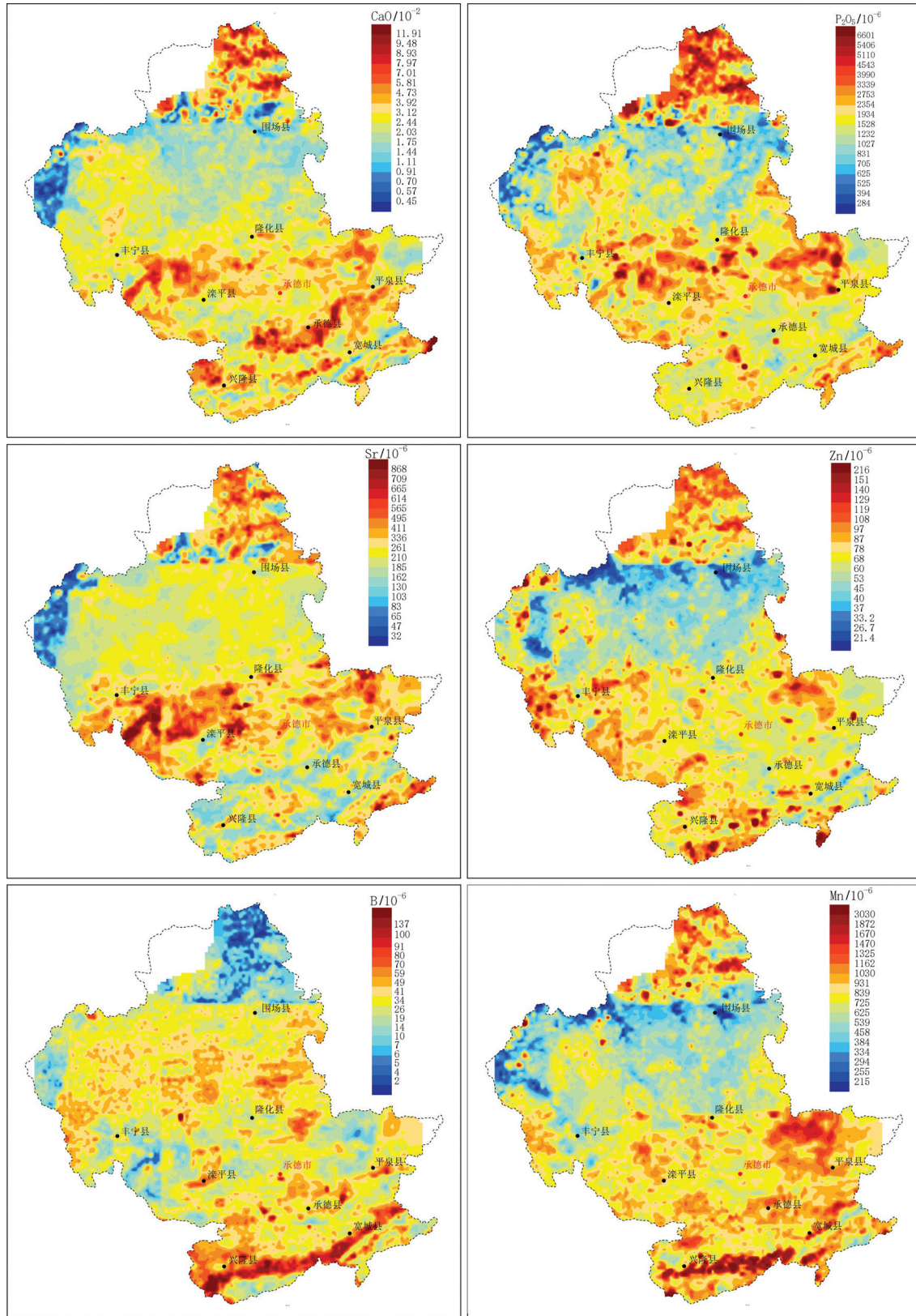


图5 承德市元素地球化学图(1:250000)

Fig.5 Element geochemistry of Chengde City (1:250000)

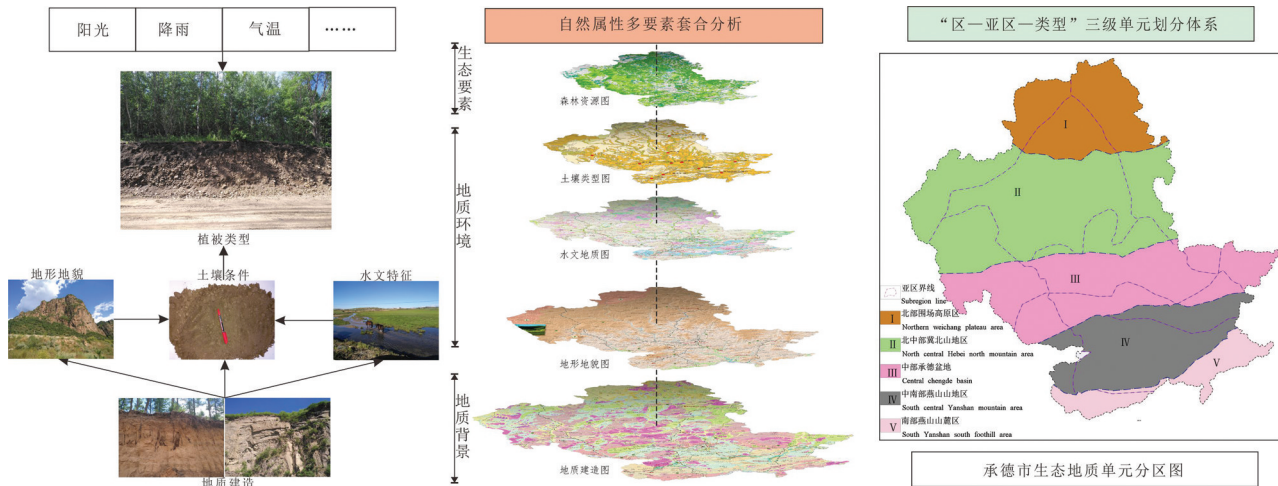


图6 承德市地质建造套合分析及生态地质单元分区图

Fig.6 Geological formation nesting analysis and eco-geological unit zoning in Chengde City

生长的作物、矿(山)泉水找矿潜力,以及地质灾害发育程度等生态地质基准特征(表1),可作为全域国土空间规划的重要依据。

3.2 重点小流域调查

小流域通常指二、三级支流分水岭和下游河道出口的自然汇水区域(图7)。小流域具有独立性敏感性和完整性的特征:①相对独立的生态地质(子)系统:小流域以地表水-地下水为联系纽带,具有相对独立的水循环边界、土壤和地灾条件及生态发育过程,对外界的自然与人为干扰,保持一定的弹性和稳定性;②小流域的敏感性:是人与自然相互作用最频繁、最强烈的场所,为人类提供了丰富的生态系统服务功能。村镇社区、道路交通、土壤农田、地质灾害和环境问题等都受流域制约,是人类经济活动聚集区和生态风险反馈响应敏感区(陈莉薇等,2014;蒋洪强等,2015;李月等,2018);③小流域的完整性:流域范围被分水岭所限定,也限制了流域内的水、土、地灾要素的自然影响范围,不可能跨流域分布。因此,生态地质调查、生态环境监测和生态保护修复应以流域为单元开展工作。

根据承德市地方政府对生态农业发展、生态保护与水产业发展、防灾减灾和绿色矿业发展、国际旅游城市建设等四个发展需求,在1:25万区域生态地质背景调查和生态地质单元区划的基础上,优先选择特色板栗等林果资源、地质遗迹资源等集中的爆河流域,富锶、偏硅酸矿山(泉)水集中分布的小

滦河流域和矿山地质环境突出的尹逊河流域为重点,开展小流域1:5万重点调查。

(1)围绕小流域部署1:5万标准图幅。根据小流域空间分布特征和优势资源、环境问题集中的特点,确定1:5万标准图幅,主要是便于计算工作量和未来接图编图及成果集成。

(2)围绕小流域确立1:5万调查内容。以优势自然资源类型或生态环境问题为主线,确立主要调查目标和内容,同时兼顾其他生态地质要素调查。例如,爆河流域的板栗林果资源、白云岩喀斯特地质遗迹资源丰富,调查内容主要是土地质量地球化学调查和地质遗迹资源重点调查,明确特色农产品的生态地质控制因素和地质遗迹资源类型、分布、等级等。同时在板栗集中区和地质遗迹集中区开展水文地质、地质灾害概略调查,大致了解水质、水量等水文条件对特色农业发展制约和影响,地质灾害等对地质遗迹资源开发利用的影响。2017—2018年主要根据重点调查内容的选择执行技术规范,2019年主要执行《生态地质调查技术要求》(DD2019-09),野外调查点主要根据生态地质单元类型、优势自然资源和生态环境问题特征来部署,调查点的布设不是网格状(均匀)布点,而是借鉴化探沟系次生晕的做法,在沟系布点密,远离沟系放稀至一般性控制点。在相同(似)的生态地质单元内,针对优势自然资源和生态环境问题,选择一个沟系或者微流域加密部署,其他稀疏控制,野外数

表1 承德市生态地质单元分区特征
Table 1 Characteristics of the zoning eco-geological unit in Chengde

分区	I 北部围场高原边缘区	II 北中部丰宁—隆化冀北山区	III 中部滦平—承德盆地	IV 中南部宽城—兴隆燕山山脉区	V 南部孤山子—峪耳崖燕山南麓区
建造类型	①现代河(沟)冲砂、砾石亚建造,岩性主要为砂砾石、砂土;②玄武岩亚建造,以汉诺坝玄武岩为主;③第四纪亚砂土、亚黏土亚建造	①流纹岩亚建造,包括流纹岩,少量粗面岩、安山岩;②花岗岩类亚建造,包括钾长花岗岩、花岗斑岩、正长岩	①(二长)花岗岩类亚建造,包括碳酸盐岩建造,①碳酸盐岩建造,包括灰岩、含铁锰白云岩、白云岩;②砂岩亚建造,主要为石英长石砂岩;③页岩亚建造	①片麻岩亚建造,岩性主要为角闪斜长片麻岩、二长片麻岩等;②砂岩亚建造,主要为石英长石砂岩	
地貌区划和类型	①西北侧属于内蒙古高原区的御道口风沙小区和坝缘中山小区;②东南侧属于华北山区的围场、赤城小区,中等—浅切割的侵蚀—剥蚀中山类	①主体位于华北山区的围场、赤城小区;②西北侧少部分属于多伦小区,为高侵位—剥蚀丘陵地貌	属于华北山区的燕山侵蚀—剥蚀中山—低山—丘陵的兴隆—宽城中山低山区	属于华北山区的燕山侵蚀—剥蚀中山—低山—丘陵的密云—迁西丘陵小区;属于燕山山地南坡	
地球化学特征	面状分布CaO、K ₂ O、MgO、P ₂ O ₅ 、Fe ₂ O ₃ 、Cu、Mo、Mn、Zn、Sr元素高背景	零星分布Mo元素点状高背景	串珠状分布P ₂ O ₅ 、Fe ₂ O ₃ 、Mo、Sr元素高背景	串珠状分布CaO、MgO、Cu、Mo、Mn、Zn、Sr元素高背景	
水文地质条件	以灰色森林土、棕壤为主,次为淋溶性土,少量潜育草甸土;利用类型为天然牧草地、有林地为主,次为旱地、园地;以耐寒马铃薯和谷、豆等杂粮种植为主	以棕壤为主,次为(淋溶)褐土;利用类型为有林地、灌木林地、果园、旱地;以蔬菜、果树和苹果、山楂等果林为主	以褐土性土为主,次为淋溶棕壤、淋溶褐性土、褐土性土均有分布;利用类型为林地、果园;以玉米和苹果、板栗等为主	以棕壤、淋溶褐性土、褐土性土均有分布;利用类型为林地、果园;以玉米和苹果、板栗等为主	淋溶褐土为主,次为褐土性土,少量棕壤;利用类型为果园、灌木性林地,次为园地、有林地;以玉米、板栗种植为主
工程地质条件	孔隙水发育,汉诺坝玄武岩穴水属于地质灾害低易发区,偶发泥石流	裂隙水发育	偏硅酸的裂隙水发育	岩溶水发育,地热资源丰富	富锂、铍裂隙水发育
旅游资源	生物景观类为主,草原与草地、树木旅游资源丰富	属于地质灾害中等易发区,以崩塌为主	属于地质灾害高易发区,矿业开发活动	属于地质灾害中等易发区,滑坡为主	属于地质灾害低易发区
人文	皇家御道文化	地文景观类为主,断层、生物化石等资源丰富	地文景观类为主,断层、生物化石等资源丰富	地文景观类为主,断层、生物化石等资源丰富	地文景观类为主
		长城遗址	长城遗址	长城遗址、抗战文化	

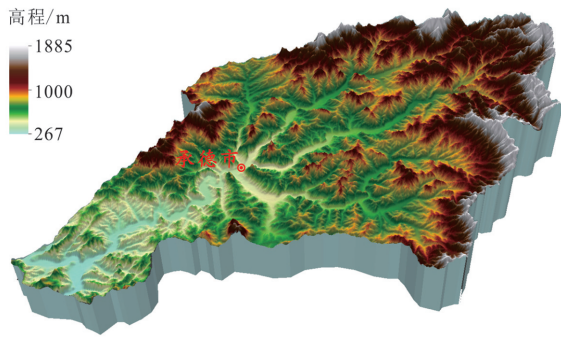


图7 承德市武烈河小流域示意图
Fig.7 Schematic diagram of Wulie River watershed in Chengde City

据采集方法(如土壤、水样和地灾观测)执行各专业技术规范要求。

(3)以小流域为单元进行资源潜力评价和环境风险评估。按图幅开展调查,以小流域为单元综合评价,按行政单元成果集成,提供应用服务产品。按小流域开展生态地质综合评价,一方面揭示小流域生态地质系统空间结构特征、植被与土地利用自然空间分带性、流域上下游景观格局等特征;另一方面对各类优质自然资源质量、数量和生态环境问题程度进行概率分级。资源潜力评价和环境风险评估分为3个层次:(1)按照各专项工作进行单项评价,例如参照1:5万土地质量地球化学调查评价土地质量综合等级,地质灾害易发性评价等;(2)根据生态地质单元的相似性,对小流域的各个生态地质

单元开展单要素专项评估;(3)以小流域为单元,针对优势自然资源和生态环境问题开展综合评估,综合评估的方法主要是采用层次分析方法对各单要素专项评估。

3.3 生态关键带研究

地球关键带(Earth's Critical Zone)是陆地生物活动的关键地带,其垂向范围从植被冠层顶端—包气带—松散含水层—基岩(Goldhaber et al.,2014)。地球关键带是大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的交汇带(Anderson,2015),又称为“多圈层交互作用带”。目前地球关键带研究侧重两个尺度:宏观尺度利用各类遥感数据进行面状监测,微观尺度利用传感器技术和测量进行点上监测,中间尺度的工作方法研究较少(杨建锋等,2014)。

本次是在小流域和地市级行政尺度开展生态地质调查工作的。在地球关键带的基础上引伸提出了“生态关键带”的概念,其垂向空间范围和分带性与地球关键带一致(图8)。之所以称为生态关键带是基于以下考虑:①突出关键带对生态系统的支撑作用,对维持生态系统服务功能和生态系统健康起着关键作用;②地球关键带的下界基岩被作为含水层的“底板”看待,而在生态关键带中则强调其地质建造属性——上覆风化层的母岩,通过水-岩相互作用和物理、化学、生物等风化过程,直接制约了上覆风化壳和土壤的特性,控制着生态系统的发育格局和多样性;③地球关键带更适合大区域尺度的

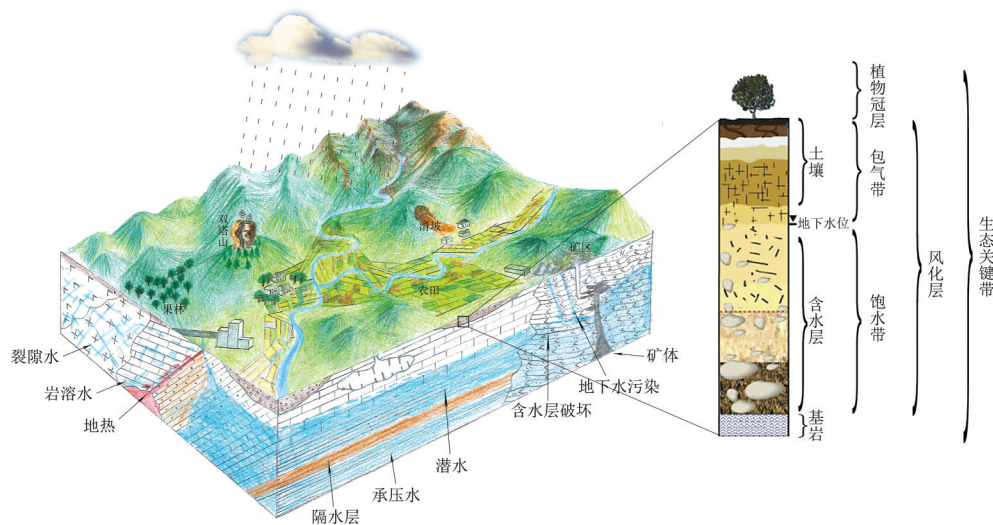


图8 承德市生态地质系统模型及生态关键带示意图
Fig.8 Schematic diagram of eco-geological system model and ecological critical zone

表2 生态关键带调查研究内容
Table 2 Research content of ecological critical zone

调查层次	调查对象	调查手段	研究目的	样品采集
植被层	①植被类型(乔、灌、草)②根系形态(垂直状、辐射状、扁平状、串联状、须状)	①遥感解译植被类型; ②不同生态地质单元 野外调查	植被类型及植被根系对养分、水分利用	
土壤层	①土壤层厚度 ②土壤质地	①剖面测量;②高密度电阻率等物探测量;③浅钻验证	研究土壤养分、质地结构特征	土壤样品,分析养分、环境元素含量和粒度
水文条件	①土壤水含量 ②地下水潜水面	①野外观察;②土壤含水量野外测量;	研究土壤水的分布、地下水毛管水以及渗透性	水质分析样品
风化壳	①风化壳厚度 ②风化程度	①野外测量;②裂隙发育统计;	研究岩石风化与成土关系及水文条件控制	风化壳样品,研究成壤过程和元素迁移规律
基岩层	①岩层产状 ②岩石类型	野外测量	分析岩石地球化学和矿物组合,研究基岩对土壤、水文及植被影响	基岩样品

研究与对比,而生态关键带则适合生态地质调查的图幅或小流域尺度,以精细刻画基于地质建造的生态地质亚类型(亚系统)的多样性、分布格局与控制机理。

深入研究生态关键带的结构、功能、演化与调控机制,将为解决国土空间规划、用途管制及生态保护修复提供有效的方法手段,是服务生态文明建设的一项基础性调查研究工作。①生态关键带从下伏基岩建造—含水层(风化层)—土壤(包气带)—植物冠层的系统研究,有助于精准揭示生态地质系统正向、负向反馈机制及生态地质系统的形成演化机理,评价生态自然修复能力;②对1:5万生态地质调查优选出的重点解剖区域,开展大比例尺(1:1万)生态关键带立体填图,有助于查明生态地质系统的三维结构、优势(特色)生态地质资源或生态环境问题形成机理和控制因素,从而提出科学的解决方案;③对生态关键带的综合监测,是解决目前监测碎片化的有效手段,有助于整合各部门(专业)监测成果,对区内生态环境的现状和演变趋势做出科学的预测,李俊琦等(2019)对江汉平原关键带的监测是有益探索。

开展了基于地质建造的生态关键带解剖研究,调查研究部署以小流域为主,兼顾地质建造和生态地质单元。小流域内相同(似)的地质建造和生态地质单元,围绕一个典型微流域进行重点解剖,其他微流域进行对比调查分析。利用天然和人工剖面进行系统的野外观测和样品采集,按照生态关键

带组成要素的空间结构,对5个分层10个要素进行重点调查研究(表2):植被类型、根系特点—土壤厚度、土壤质地—土壤水含量、潜水面——风化壳厚度、风化程度——底部基岩层产状、岩石(建造)类型,采集岩石、土壤、水、植物等样品,分析粒度等物理特性和元素地球化学特征。研究内容包括3个方面:①基岩—土壤—植被生态地球化学过程研究,分析有益和有害元素迁移特征及影响;②生态水文循环过程研究,分析地表水、地下水、土壤水的相互转化过程对生态资源和环境问题影响;③生态关键带空间结构研究,了解土壤层厚度、风化壳裂隙、岩层产状等对植被、灾害等影响。在此基础上,研究不同生态地质单元的典型关键带的作用过程,综合评价地质环境对生态环境影响,对重点和典型关键带,进行长期监测。

2017—2018年,针对沙漠化地质成因,在小滦河流域开展了河湖相—风成相堆积建造生态关键带研究,针对高品质果林与地质环境的成因关系,开展了瀑河流域片麻岩建造、白云岩建造关键带研究,探索了地质过程对沙漠化和特色农业等生态环境的制约作用,并优选典型的生态关键带建设临时综合监测点。

4 生态地质调查成果应用

承德市国家生态文明示范区综合地质调查,既要探索出一套适合山区生态地质调查的技术方法和技术流程,又要面向国家和地方需求,实现调查

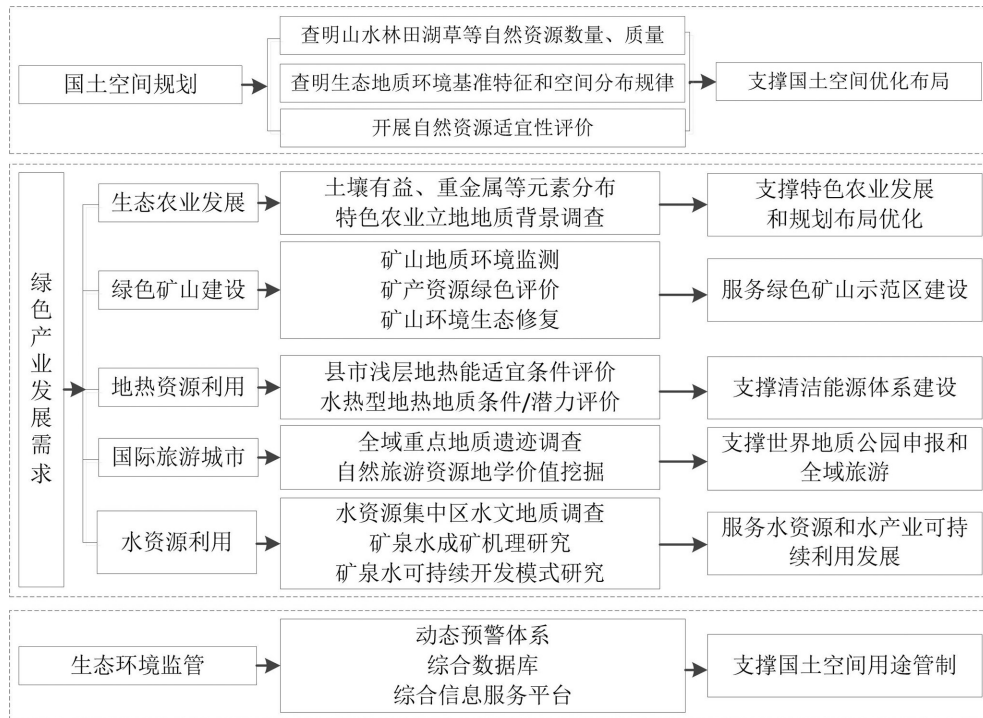


图9 承德市生态地质调查“需求—调查—转化”体系示意图

Fig. 9 Schematic diagram of "Demand-Survey-Application" system for eco-geological survey in Chengde City

成果的及时转化服务,初步建立了支撑生态承德建设的“需求—调查—转化”体系(图9)。

(1)服务农业种植结构优化。优质农特产品生长往往对特定元素具有亲和性(选择性),如优质板栗喜欢生长在富Fe、Mn的土壤中,优质山楂喜富Fe、Mn、Zn的土壤,核桃喜富Ca、Zn的土壤,这些土壤中富集的特定元素来源于高背景基岩建造就近风化作用,是形成优质农特产品的先决条件之一。承德南部兴隆—宽城一带是传统的山楂、板栗产区,在承德市果品产业布局中规划为山楂板栗优势产区(图10a)。本次以瀑河流域为重点,通过地质建造调查编图(图10b),并与元素地球化学图的套合分析,发现区内特定元素富集区与地质建造有强对应关系。其中,片麻岩建造区的土壤呈中性,Fe、Mn、B、Zn含量较高,适宜板栗生长;碳酸盐岩建造区土壤呈碱性,Ca、Zn等含量较高,适宜核桃生长,砂页岩建造区沙质土壤呈中性,Fe、Mn、B含量较高,较适合山楂生长。据此,依据区内地质建造的分布规律,将原规划的山楂板栗优势产区,优化细分为5个林果特色产区(图10c),初步筛选出山楂适宜区面积为997 km²,核桃适宜区面积为228 km²,

板栗适宜区面积为999 km²。

(2)服务国土空间规划和生态保护修复。在坝上小滦河流域沙漠化生态脆弱区,开展了基于地质建造的国土空间适宜性评价。以御道口牧场一带为重点调查区,将该区划分为汉诺坝玄武岩建造、河道冲洪积亚建造、风积沙—湖相残积亚建造、风积沙亚建造。根据地质建造空间结构、水循环条件、土壤质地养分和植物生长习性,按照宜林宜草宜耕宜湿的原则,在御道口牧场一带提出玄武岩残积宜林区、河道冲洪积宜耕区、薄层风积砂和湖相残积宜草区、厚层状风积砂生态保护修复区。

(3)服务矿山环境问题的甄别和绿色矿山建设。在承德中部伊逊河流域是钒钛磁铁矿矿集中区,通过生态地质调查和生态关键带研究,科学识别出自然高背景场和人为污染源的类型及分布特征:发现矿区周边与铁矿床有关的镉、铬、镍等重金属元素深层和浅表异常形态和强度基本一致,判断为成矿过程中形成的自然高背景场;浅层砷、铅、汞等重金属元素的异常形态与深部的不同、强度高于深层,推测浅层土壤中可能叠加了农业等其他污染源。

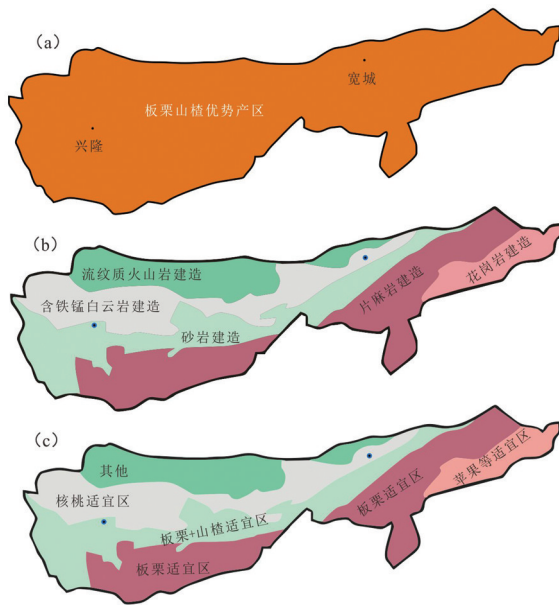


图10 承德市南部特色林果种植结构优化建议方案
a—原规划方案;b—地质建造类型;c—种植结构优化建议方案
Fig. 10 Scheme for optimizing the planting areas for typical forests and fruits in the southern part of Chengde City
A— Original planning scheme; B— Type of geological formation;
C— Proposed scheme for planting structure optimization

(4)服务生态地质旅游。在承德南部蟠龙湖库区的地质遗迹综合调查,发现其具有景观价值的地质遗迹,主要发育在砂岩建造和碳酸盐岩建造分布区,并圈定了各类地质遗迹资源。其中,基础地质类28个,地貌景观类35个,地质灾害类1个,查明影响旅游开发的地质灾害等生态环境问题,提出了蟠龙湖景区“龙形”河曲景观开发利用建议,支撑地质遗迹保护、全域旅游和乡村振兴规划。

5 结论

(1)生态地质调查研究对象是生态地质系统,即一定的自然空间内生态与浅表地质环境构成的统一整体。地质建造直接影响生态发育的水土条件、地形地貌和破坏性的致灾条件,不同地质建造类型(如碳酸盐岩建造和花岗岩建造),其土壤地球化学、地貌景观(地质遗迹)、工程岩组、水文地质等基本特征和发育规律不同,而同类建造则具有相似的地质-生态环境基准特征。地质建造编(填)图和基于地质建造的多要素套合分析,是山区生态地质调查的一种有效方法(尤其是1:25万层次),有利于快速了解全域生态地质背景和分区分带格局,划分

生态地质单元,优选生态地质靶区(生态资源优势区和生态环境问题区)。

(2)以地质建造分析为基础,探索总结了一套适合山区的生态地质调查技术方法框架,包括全域地质建造编(填)图和要素套合分析(1:25万)、小流域综合地质调查(1:5万)和生态关键带调查(1:1万)及动态监测,从不同尺度逐步深化对生态地质系统的认知。

(3)以承德市“三区一市”的发展定位为导向,构建了生态地质调查的“需求—调查—转化”体系框架。查明生态地质环境基准特征和分布格局,开展基于地质建造的国土适宜性评价,支撑承德市国土空间规划和生态保护修复;开展优势(特色)生态地质资源调查评价,服务绿色矿山、生态农业、旅游地质、矿泉水产业等生态产业发展;探索建立基于生态关键带和地质建造的生态环境监测体系和综合信息服务平台,支撑自然资源和生态环境管理。

致谢:“承德市国家生态文明示范区综合地质调查”项目的实施,得到了中国地质调查局水环部、总工室的支持和指导。工程首席马震、殷志强和二级项目负责人刘宏伟、张竞、李霞、刘文波等提出了建设性的指导意见;承德市自然资源局吴双麒局长、任玉祥、王涛子和承德514队张建强、张小敏及承德地质四队王瑞峰等给予大力支持;北京矿产地质研究院付水兴、李月臣、李素云等参与项目研讨和现场指导,项目组何泽新、孙厚云、贾凤超、王恒、李健、李多杰、柴星等参与了项目的具体调查及研究工作,在此一并致以衷心感谢!

References

- Anderson R S. 2015. Pinched topography initiates the critical zone[J]. *Science*, 350(6260): 506–507.
- Chen Liwei, Xu Xiaochun, Wang Jun, Chen Fang. 2014. Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China[J]. *Environmental Science*, 35(8): 2967–2973(in Chinese with English abstract).
- Golodhaber M B, Mills C T, Morrison J M, Stricker C A, Mushet D M, Labaugh J W. 2014. Hydrogeochemistry of prairie pothole region wetlands: Role of long-term critical zone processes[J]. *Chemical Geology*, 387: 170–183
- Geological Dictionary Office of the Ministry of Geology and Mineral Resources. 1983. *Geological Dictionary(1): General Geology and Tectonic Geology (volume 2)* [M]. Beijing: Geological Publishing

- House, 116(in Chinese).
- Hahn W J, Riebe C S, Lukens C E. 2014. Bedrock composition regulates mountain ecosystems and landscape evolution[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(9): 3338–3343.
- Lukasz Pawlik, Jonathan D Phillips, Pavel Samonil. 2016. Root, rock, and regolith: Biomechanical and biochemical weathering by trees and its impact on hillslopes—A critical literature review[J]. Earth–Science Reviews, 159: 142–159
- Hahn W J, Rempe D M, Dralle D N, Dawson T E, Lovill S M, Bryk A B, Bish D L, Schieber J, Dietrich W E. 2018. Lithologically controlled subsurface critical zone thickness and water storage capacity determine regional plant community composition[J]. Water Resources Research, 55. <https://doi.org/10.1029/wr023760>.
- He Zhengwei, Huang Runqiu, Sun Chuanmin, Wu Boqing, Hang Lingling, He Fenqin, Sun Yujiang, Yi Jianzhong, Liu Shaojun Zhao Yinbing. 2003. A brief discussion on “eco–geology” [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 3(20): 69–72(in Chinese with English abstract)..
- Huang Runqiu. 2001. Basic characteristics and technical support of the eco–environmental geology[J]. Geology in China, 28(11): 20–24 (in Chinese).
- Jiang Hongqiang, Wu Wenjun, Yao Yanling, Liu Nianlei, Wang Jinnan, Bi Jun, Yao Ruihua. 2015. Coupling watershed environmental model with optimizing method to provide least cost alternatives in environmental planning and management[J]. Ecology and Environmental Sciences, 24(3): 539–546 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinfa. 2014. Geological survey for ecological civilization [J]. Resources Environment & Engineering, 28(1): 1–4(in Chinese with English abstract).
- Li Yue, Qi Shi. 2018. Ecological civilization small watershed of construction of soil and water conservation[J]. China Population, Resources And Environment, 28(S2): 14–17 (in Chinese with English abstract) .
- Li Junqi, Ma Teng, Deng Yamin, Du Yao, Wang Zhiqiang, Jiang Yuehua. 2019. Progresses on monitoring network construction of Earth's Critical Zone in Jiangnan Plain[J]. Geological Survey of China, 6(5): 115–123(in Chinese with English abstract).
- Li Tingdong. 1999. Strengthening study and geological mapping of the earth surface system[J]. Quaternary Sciences, (3): 191–196(in Chinese with English abstract)
- Ma Shouxian, Meng Qingren, Qu Yongqiang. 2011. A study of detrital zircons of Late Carboniferous– Middle Triassic strata in the northern margin of North China block and its geological implication[J]. Geological Bulletin of China, 30(10): 1485–1500 (in Chinese with English abstract) .
- Mou Baolei. 1999. Elemental Geochemistry [M]. Beijing: Peking University Press(in Chinese).
- Shi Jiansheng, Ma Rong, Ma Zhen. 2019. Regional investigation of the earth's critical zone[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(6): 767–780 (in Chinese with English abstract).
- Sun Xiangyang. 2005. Soil Science [M] Beijing: China Forestry Publishing House(in Chinese).
- Yang Jianfeng, Zhang Cuiguang. 2014. Earth's critical zone: A holistic framework for geo–environmental researches[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 41(3): 98–106(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhanjun, Zhang Senqi, Li Bangmin, Wang Yonggui, An Yong, Shi Weidong, Xin Yuanhong. 2008. On the method of geologic investigation and mapping in Qinghai–tibet plateau. Northw estern geology, 41(3): 112–131(in Chinese with English abstract) .
- Trofimov V T, Andreeva T V. 2010. Ecological geological systems and their types, position in the ecosystems structure and tasks of the investigation[J]. Earth Science Frontiers, 17(2): 425–438

附中文参考文献

- 陈莉薇,徐晓春,王军,陈芳. 2014. 铜陵相思河流域重金属分布特征研究[J]. 环境科学, 35(08): 2967–2973.
- 地质矿产部地质辞典办公室. 1983. 地质辞典(一): 普通地质 构造地质分册[M]. 北京: 地质出版社.
- 何政伟, 黄润秋, 孙传敏, 吴柏青, 韩玲玲, 贺奋勤, 孙渝江, 尹建忠, 刘少军, 赵银兵. 浅议“生态地质学”[J]. 国土资源科技管理, 2003, 3(20): 69–72.
- 黄润秋. 2001. 生态环境地质的基本特点与技术支撑[J]. 中国地质, 28(11): 20–24
- 蒋洪强, 吴文俊, 姚艳玲, 刘年磊, 王金南, 毕军, 姚瑞华. 2015. 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, 24(3): 539–546.
- 李金发. 2014. 为生态文明服务的地质调查工作[J]. 资源环境与工程, 28(1): 1–4.
- 李俊琦, 马腾, 邓娅敏, 杜尧, 王志强, 姜月华. 2019. 江汉平原地球关键带监测网建设进展[J]. 中国地质调查, 6(5): 115–123.
- 李廷栋. 1999. 加强地球表层系统的研究和地质制图工作[J]. 第四纪研究, 3: 191–196.
- 李月, 齐实. 2018. 建设水土保持生态文明小流域的思考[J]. 中国人口·资源与环境, 28(S2): 14–17.
- 马收先, 孟庆任, 曲永强. 2011. 华北地块北缘上石炭统一中三叠统碎屑锆石研究及其地质意义[J]. 地质通报, 30(10): 1486–1500.
- 牟保磊. 1999. 元素地球化学[M]. 北京大学出版社.
- 孙向阳. 2005. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社.
- 石建省, 马荣, 马震. 2019. 区域地球多圈层交互带调查探索研究[J]. 地球学报, 40(6): 767–780.
- 杨建锋, 张翠光. 2014. 地球关键带: 地质环境研究的新框架[J]. 水文地质工程地质, 41(3): 98–106.
- 杨站君, 张森琦, 李邦民, 王永贵, 安勇, 石维栋, 辛元红. 2008. 青藏高原升天环境地质调查与填图技术方法研究. 西北地质, 41(3): 112–131.