

# 地质建造与生态特征相关性分析与环境修复应用-基于大别山西段罗山地区的实践

李新<sup>1</sup>, 董好刚, 谢翔, 罗敏玄, 吴丰, 杨涛, 黄锦彦

(中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南长沙 410600)

**摘要:** 【研究目的】地质建造是地质环境的载体, 研究地质建造与生态特征的相关性, 有助于正确认识生态问题的成因, 服务生态环境精准修复。【研究方法】本文选择兼具低山、丘陵、平原的罗山县为研究区域, 在罗山县地质背景和构造演化特征梳理的基础上, 划分出 13 个地质建造类型; 基于剖面调查、数据统计、水文参数试验等手段, 从岩石、土壤、水文地质、地形坡度四个方面对 4 个典型地质建造的地质特征进行分析, 并对生态特征和地质建造的相关性进行了探讨。以水土流失为例, 基于地质建造进行了空间分布、成因分析和修复建议。【研究结果】结果表明, 从低山丘陵区白垩纪酸性岩浆岩建造到丘陵岗地区白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造, 其母质层及土壤层厚度总体不断增加, 其砾石含量及砂的含量逐渐变少, 土壤颗粒粒度变小, 因此土壤质地由砾石土(砂质壤土)、砂质壤土、粉质壤土、壤土逐渐变化; 植被由天然次生林向人工种植的经济林过渡, 植被类型由多样性趋于单一性, 但树高胸径不断增大; 地质建造与生态特征相关性较强。基于地质建造的成因分析表明, 水土流失在不同地质建造发育程度不同, 其中白垩纪酸性岩浆岩建造内发育最严重。水土流失问题与不同地质建造内的地形坡度、岩石的矿物组成和粒度有较强的相关性。【结论】以建造为单元分析生态特征具有较好的针对性和应用前景, 能够更多体现地质对生态的约束, 研究结果可为罗山县生态保护和水土流失等生态问题精准修复提供地学依据。

**关键词:** 地质建造; 生态特征; 母质; 土壤; 植被; 精准修复; 罗山县

**创新点:** 基于大量的调查及试验数据, 定性分析了地质建造与生态特征的相关性; 以水土流失为例探讨了基于地质建造的生态问题成因及与精准修复建议。

## Correlation analysis of formation and ecological characteristics and application of environmental restoration-Based on the practice of Luoshan area in the western section of Dabie Mountains

LI Xin, DONG Haogang, XIE Xiang, LUO Minxuan, WU Feng, YANG Tao, HUANG Jinyan  
(Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changsha 410600, Hunan, China)

**Abstract:** This paper is the result of ecological geological survey.

**[Objective]** Formation is the carrier of the geological environment. Studying the correlation between formation and ecological characteristics is helpful to correctly understand the causes of ecological problems and serve the precise restoration of the ecological environment. **[Method]** In this paper, Luoshan County, which has both low mountains, hills and plains, is selected as the research area. On the basis of combing the geological background and tectonic evolution characteristics of Luoshan County, 13 geological formation types are divided; Based on profile survey, data statistics, hydrological parameter test and other means, the geological characteristics of four typical geological formations were analyzed from the four aspects of rock, soil, hydrogeology and terrain slope, and the correlation between ecological characteristics and geological formations was discussed. Taking soil erosion as an example, the spatial distribution, cause analysis and restoration suggestions are carried out based on geological formation. **[Results]** The results show that, from the Cretaceous acid magmatic rock formation in

**基金项目:** 中国地质调查局项目“大别山区西段生态修复支撑调查”(DD20208074)、“南平市典型红壤区地表基质调查”(DD20220865)、“浙南诸河流域地下水调查评价”(ZD20220215)共同资助。

**作者简介:** 李新, 男, 1992年生, 工程师, 主要从事生态地质调查研究工作; E-mail: [1303315468@qq.com](mailto:1303315468@qq.com)。

**通信作者:** 董好刚, 男, 1970年生, 教授级高级工程师, 主要从事生态及环境地质研究; E-mail: [645226820@qq.com](mailto:645226820@qq.com)。

the low mountain and hilly area to the Cretaceous continental pyroclastic rock-volcanic formation in the hilly area, the thickness of the parent material layer and soil layer has been increasing, and the content of gravel and sand has increased. Gradually less, the particle size of the soil becomes smaller, so the soil texture gradually changes from gravel soil (sandy loam), sandy loam, silty loam, and loam; the vegetation transitions from natural secondary forest to artificially planted economic forest, and the vegetation type changes from diversity It tends to be single, but the tree height and diameter at breast height are increasing; the correlation between geological formation and ecological characteristics is strong. The genetic analysis based on geological formations shows that soil erosion develops differently in different formations, among which the Cretaceous acidic magmatic rock formation is the most serious. The problem of soil erosion has a strong correlation with the terrain slope, mineral composition and grain size of rocks in different formations. **[Conclusions]** Using formation as a unit to analyze ecological characteristics has better pertinence and application prospects, and can more reflect the constraints of geology on ecology. The research results can provide a geological basis for accurate restoration of ecological protection and soil erosion in Luoshan County.

**Key Words:** formation; geological characteristics; parent material; soil; vegetation; accurate restoration; Luoshan County

**Highlights:** Based on a large number of survey and experimental data, the correlation between geological formation and ecological characteristics is qualitatively analyzed. Taking soil erosion as an example, the causes of ecological problems based on geological formation and suggestions for precise restoration are discussed.

**About the first author:** LI xin, male, born in 1992, engineer, mainly engaged in the investigation and research of ecological geological; E-mail: 1303315468@qq.com.

**About the corresponding author:** DONG haogang, male, born in 1970, Professor-level senior engineer, mainly engaged in the investigation and research of ecological and environmental geological; E-mail: 645226820@qq.com.

**Fund support:** Support by the Projects of China Geological Survey "Ecological Restoration Support Survey in the Western Section of Dabie Mountains" (No.DD20208074), "Investigation of Ground Substrate in typical red soil area of Nanping City" (No.DD20220865) and "Investigation and evaluation of groundwater in river basins of southern Zhejiang" (No.ZD20220215).

## 1 引言

生态地质特征是在近地表地质与生态相互作用下,通过岩石、土壤、水、植被所呈现出的外在特征,植被为生态的外在表现,土壤和水为桥梁与载体,岩石为生态提供所需要的物质基础(何政伟等,2002;汪振立等,2016;王京彬等,2020;卫晓峰等,2020;聂洪峰等,2021)。地质建造是指同一时代、同一构造环境、同一地质作用下形成的,宏观上可识别填绘的一套岩石组合(地质矿产部地质辞典办公室,2005)。地质建造的地质属性决定了岩石、土壤、水分等的初始特征,进而影响到生态特征,表现为不同的生态现状或生态问题(Hahm W J等,2014;Lukasz Pawlik等,2016;Hahm W Jesse等,2019;王京彬等,2020;卫晓峰等,2020)。首先,地质建造类型影响风化成土的难易程度(张凤荣,2021),其上覆形成的土壤厚度有着明显的差异,如大别山西段地区酸性岩浆岩建造内的土壤厚度较中元古代变基性火山-沉积建造内的薄。其次,地质建造对风化形成的土壤质地有着直接的制约作用,基岩的矿物组成和矿物粒度往往会影响到风化后形成的土壤质地(贾磊等,2022),如大别山区西段地区酸性岩浆岩建造内形成的土壤质地以砾石土(砂质壤土)和砂土为主,中元古代变基性火山-沉积建造内形成的土壤质主要为壤土和粉质壤土。第三,丘陵山地区土壤主要为下伏基岩就近风化的残积物和坡积物(贾磊等,2022),土壤中的原生矿物风化和次生矿物的进一步风化向土壤释放养分和矿质营养元素,因此地质建造的地球化学特征直接影响土壤元素在不同空间上的分布(吴次芳,1992;严明书等,2018;刘孜等,2020;刘洪等,2023)。第四,部分学者基于地质建造单元开展成土母质及土壤的划分、生态地质编图等,并在此基础上开展生态地质调查和评价,取得了较好的效果(王京彬等,2020;卫晓峰等,2020;

孙厚云等, 2020; 刘洪, 2023)。以地质建造为单元进行生态特征分析及相关性探讨, 对于研究生态作用的地质机理, 为生态保护和修复提供基础数据和支撑具有重要的意义。

为有效支撑生态文明建设, 国土资源部中国地质调查局陆续在全国各地开展了多个生态地质调查项目, 从不同范围和尺度研究了生态地质调查评价的思路和方法、目的和重点(王长生等, 1997; 王长生等, 1998; 陈树旺等, 2011; 陈树旺等, 2012; 刘洪等, 2020; 王京彬等, 2020; 卫晓峰等, 2020; 聂洪峰等, 2021)。从地学的角度研究生态问题和作用机理, 比单纯从生态角度研究保护和修复有了长足的进步(王长生等, 1997; 王长生等, 1998; 陈树旺等, 2012; 刘洪等, 2020; 王京彬等, 2020; 卫晓峰等, 2020; 聂洪峰等, 2021)。但如何结合不同生态功能区现状, 研究地质与生态相关性, 仍值得深入探讨。

大别山是淮河中游、长江下游重要的国家级水源涵养区, 也是国家重要的水土流失防治生态功能区。本文选择兼具低山、丘陵、平原地貌的大别山水源涵养区-罗山县为研究区域, 在划分地质建造的基础上, 从岩石、土壤、水文地质、地形坡度四个方面对典型地质建造的地质特征进行分析, 探讨了生态特征和地质建造的相关性, 并基于地质建造分析了水土流失等问题分布及成因, 为精准修复提供地学依据。

## 2 研究区地理与地质

### 2.1 地理概况

大别山位于河南省、湖北省及安徽省交界处, 西段位于河南及湖北交界处(图 1(a)), 罗山县位于大别山西段北麓, 淮河南岸, 由南向北从山地丘陵过渡至平原(图 1(b)), 为国家重点生态功能区-水源涵养区, 总面积 2071km<sup>2</sup>。研究区属北亚热带大陆性季风湿润气候, 四季分明、雨量充沛、日照充足、温暖湿润。降水时空分布不均, 夏季多暴雨, 秋季多旱涝。年平均气温 15.1℃, 多年平均降水量 1023.4mm(1971~2000 年)(孙成永, 2018)。罗山县主要属淮河流域, 两大支流分别为竹竿河和浉河。

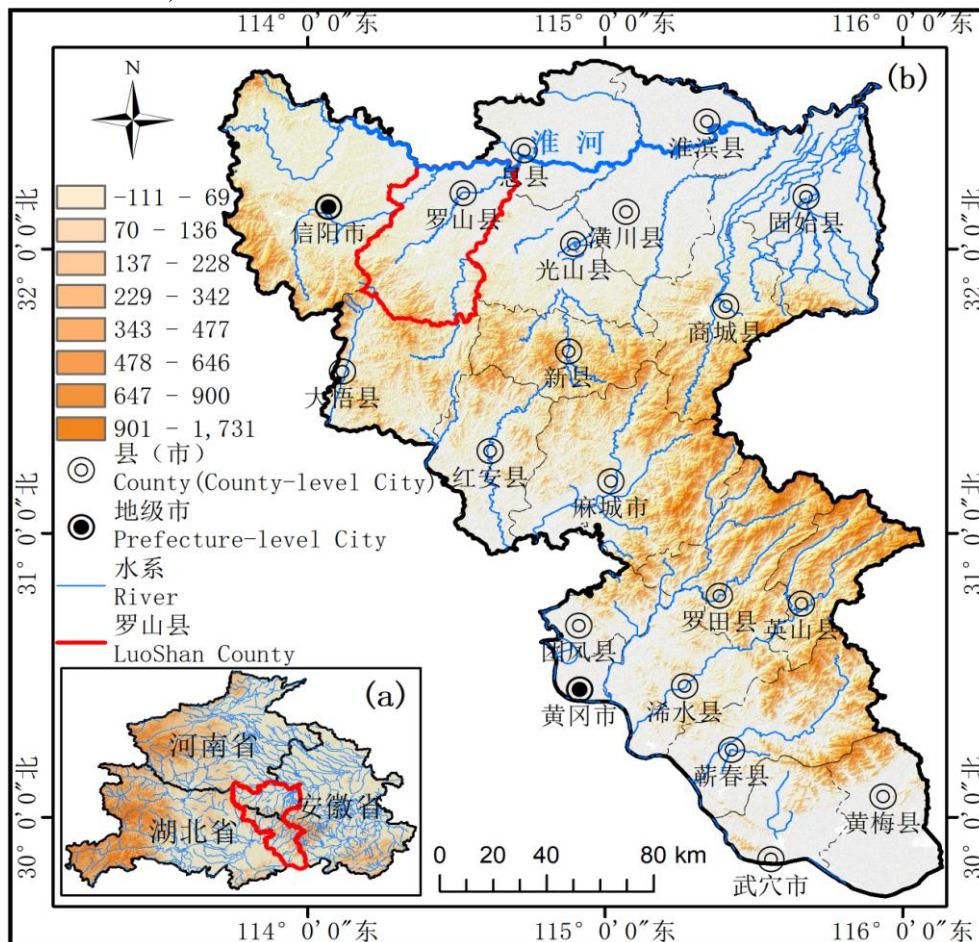


图 1 罗山县地理位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of Geographical location of Luoshan County

## 2.2 区域地质背景

### 2.2.1 地层

从古元古界至新生界均有不同程度的发育，其中以元古宇、寒武系、泥盆系的变质岩地层最为发育，地质单元的展布与区内的构造线一致，为近北西南东-东西向。古元古界的秦岭岩群岩性以含榴黑云斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩为主，中元古界龟山岩组岩性以（含榴）白云（二云）石英片岩、斜长角闪片岩为主，中新元古界浒湾岩组岩性以（含榴）白云片麻岩、白云斜长片麻岩为主。古生界定远组以变酸性火山碎屑岩和变基性火山熔岩组成多个喷发韵律，震旦系-奥陶系下统肖家庙岩组岩性以（含榴）白云斜长片岩、白云斜长石英片岩为主，寒武系岩性以斜长角闪片岩、斜长角闪变粒岩为主，泥盆系南湾岩组岩性以黑云（二云）变粒岩、绿帘白云（二云）石英片岩、云母片岩为主，石炭系花园墙组岩性以（炭质）绢云片岩为主。侏罗系段集组岩性以复成分砾岩、角砾岩为主，白垩系陈棚组岩性以陆相火山岩、火山碎屑岩和火山碎屑沉积岩为主，白垩系周家湾组岩性主要为红色陆源碎屑岩（如图2）。

### 2.2.2 岩浆岩

区内岩浆岩发育，规模较大，分布广，主要位于研究区的南部，时代主要集中于白垩纪，其次为古生代。白垩纪岩浆岩共有12个侵入单元，以灵山超单元为主，岩性主要为二长花岗岩。古生代岩浆岩多以点状分布于研究区内。

### 2.2.3 构造

研究区位于桐柏-大别造山带中段北部，区内岩浆活动较为频繁，构造变形强烈，出露古元古代以来不同时期物质，历经长期演化，地质构造极为复杂，中生代以前的变质地层呈北西-东西向带状展布，南北两侧受区域性韧性剪切断裂带挟持，构造线较稳定（彭三国等，2018）。区内发育的主要韧性剪切带有营房-白门楼-春秋庙韧性剪切带（区域上为桐柏-商城断裂）、凉亭韧性剪切带（区域上为龟-梅断裂带）、大任洼-周楼-五岳韧性剪切带及八里畈韧性剪切带（区域上为磨子潭-晓天断裂）<sup>①</sup>。

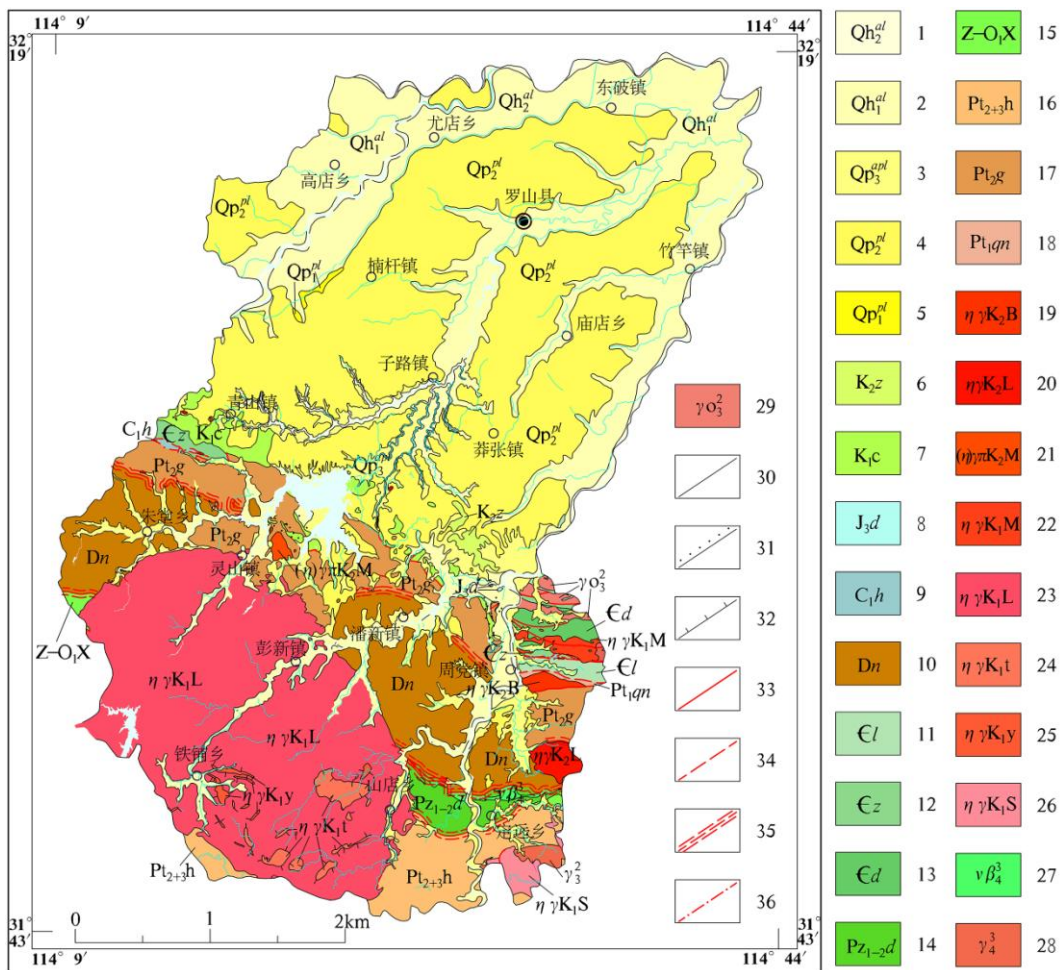


图2 罗山县地质简图

Fig.2 Geological map of Luoshan County

1 第四系中全新统冲积物；2 第四系下全新统冲积物；3 第四系上更新统冲洪积物；4 第四系中更新统洪积物；5 第四系下更新统洪积物；6 白垩系上统周家湾组；7 白垩系下统陈棚组；8 侏罗系上统段集组；9 石炭系上统花园墙组；10 泥盆系南湾岩组；11 寒武系刘山岩岩组；12 寒武系张家大庄岩组；13 寒武系大栗树岩组；14 古生界定远组；15 震旦系-奥陶系下统肖家庙组；16 中新元古界浒湾组；17 中元古界龟山岩组；18 古元古界秦岭群；19 白垩纪晚世薄刀岭独立侵入岩体；20 白垩纪晚世牢山独立侵入岩体；21 白垩纪晚世母山序列；22 白垩纪早世马鞍山独立侵入岩体；23 白垩纪早世灵山超单元；24 白垩纪早世团山独立单元；25 白垩纪早世杨湾独立单元；26 白垩纪早世烧香尖单元；27 海西期辉长辉绿岩；28 海西期四面山含榴混合花岗岩；29 加里东期片麻状石英闪长岩；30 实测地质界线；31 不整合界线；32 超动接触界线；33 性质不明断层；34 推测性质不明断层；35 韧性拆离断层；36 韧性剪切带。

1 Quaternary middle Holocene alluvial deposits; 2 Quaternary lower Holocene alluvial deposits; 3 Quaternary upper Pleistocene alluvial and diluvial deposits; 4 Quaternary middle Pleistocene diluvial deposits; 5 Quaternary lower Pleistocene diluvial deposits; 6 Upper Cretaceous Zhoujiawan formation; 7 Lower Cretaceous Chenpeng formation; 8 Upper Jurassic Duanji formation; 9 Upper Carboniferous Huayuanqiangzu formation; 10 Devonian Nanwan rock formation; 11 Cambrian Liushan rock formation; 12 Cambrian Zhangjiadazhuang rock formation; 13 Cambrian Dalishu rock formation; 14 Paleozoic Dingyuan formation; 15 Sinian-lower Ordovician Xiaojiamiaozhuang formation; 16 Mesoproterozoic and Neoproterozoic Huwan formation; 17 Mesoproterozoic Guishan rock formation; 18 Paleoproterozoic Qinling group; 19 Late Cretaceous Bodaoling independent intrusive body; 20 Late Cretaceous Laoshan independent intrusive body; 21 Late Cretaceous Mushan series; 22 Early Cretaceous Ma'anshan independent intrusive body; 23 Early Cretaceous Lingshan super-unit; 24 Early Cretaceous Tuanshan independent unit; 25 Early Cretaceous Yangwan independent unit; 26 Early Cretaceous Shaoxiangjian unit; 27 Hercynian gabbro-diorite; 28 Hercynian Simianshan garnet-bearing migmatitic granite; 29 Caledonian gneissic quartz diorite; 30 Observed geologic boundary; 31 Unconformity geologic boundary; 32 Beveling intrusive contact boundary; 33 Unknown proerty fault; 34 Supposed unknown proerty fault; 35 Ductile detachment fault; 36 Ductile shear belt;

### 3 地质建造划分及特征

#### 3.1 地质建造划分

地质建造是地壳发展的某一阶段，在特定的大地构造条件下所形成的具有成因联系的一套岩石共生组合<sup>②</sup>，相同类型的地质建造一般岩性相似，矿物和元素组分相近，在地表水和表层地下水运移中形成一定的元素迁移和富集规律，其形成的成土母质、土壤、植被具有相近的生态地质背景和生态功能特征（卫晓峰等，2019；刘洪等，2020；张腾蛟等，2021）。王京彬等学者（王京彬等，2020）认为在生态地质调查及研究过程中，地质建造应更加突出岩石组合，减轻时代的约束因素，将不同时代相同成因、物质组成和结构构造相似的岩石归并为一类。但不同时代形成的地层或岩石其含有的微量元素有明显的差异，某些微量元素可能是植物生长需要的重要元素；而构造对于地形地貌的形成、岩石的破碎及元素的迁移等有重要的影响，进而影响生态系统（吴次芳，1992；黄会前等，2016；董建华等 2018；严书明等，2018；欧阳渊等，2021）。故而在进行地质建造单元划分时，不仅应该考虑岩性组合，也要考虑时代及构造演化。

在对研究区地质背景和构造演化特征梳理的基础上，充分考虑成因类型、结构构造、地形地貌等因素，将罗山县划分为 3 个一级地质建造单元、7 个二级地质建造单元、13 个地质建造类型（图 3）。一级地质建造单元有山前平原、构造带、岩浆岩，其中山前平原下分山前冲积平原、断陷盆地 2 个二级地质建造单元，构造带下分变基性火山-沉积建造、斜坡相、裂谷体系、弧前盆地相 4 个二级地质建造单元，岩浆岩建造未进一步细分，单独划分 1 个二级建造单元（表 1）。

由图 2 看出，区内地质建造展布方向、构造线方向、地形地貌线方向皆为近北西南东-东西向，从南向北为区内地质建造类型、地貌类型变化最大的方向，按此方向依次选择四个典型的地质建造单元：白垩纪酸性岩浆岩建造、泥盆纪变类复理石建造、中元古代变基性火山-沉积建造及白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造，作为本次研究的重点。

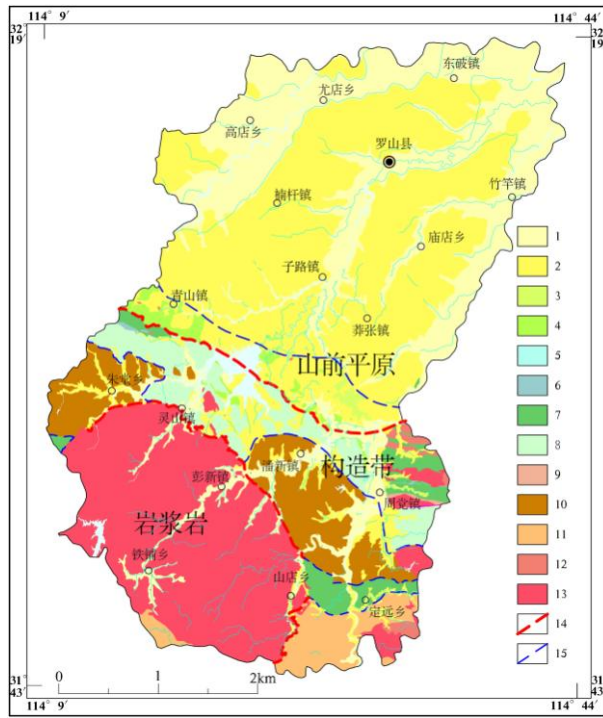


图3 罗山县地质建造图

Fig3 formation Sketch of Luoshan County

1 第四纪全新统砂砾石建造; 2 第四纪更新统亚粘土、粉砂质粘土建造; 3 白垩纪陆相碎屑岩建造; 4 白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造; 5 侏罗纪碎屑岩建造; 6 石炭纪变砂质、泥质建造; 7 早古生代变基性火山-沉积建造; 8 中元古代变基性火山-沉积建造; 9 古元古代变泥质、砂质建造; 10 泥盆纪变类复理石建造; 11 中新元古代变火山-沉积建造; 12 古生代中酸性岩浆岩建造; 13 白垩纪酸性岩浆岩建造; 14 一级建造单元分区界线; 15 二级建造单元分区界线。

1 Quaternary Holocene sandy gravel formation; 2 Quaternary Pleistocene sub-clay, silty clay formation; 3 Cretaceous continental clastic rock formation; 4 Cretaceous continental pyroclastic rock-lava formation; 5 Jurassic clastic rock construction; 6 Carboniferous sandy and argillaceous formation; 7 Early Paleozoic metabasic volcanic-sedimentary formation; 8 Mesoproterozoic metabasic volcanic-sedimentary formation; 9 Paleoproterozoic argillaceous, sandy formation; 10 Devonian metamorphic flysch formation; 11 Meso-Neoproterozoic metavolcanic-sedimentary formation; 12 Paleozoic intermediate-acid magmatic rock formation; 13 Cretaceous acidic magmatic rock formation; 14 First-level formation partition boundary; 15 Secondary formation partition boundary;

表1 罗山县地质建造类型划分表

Table 1 Classification of geological formation of Luoshan County

一级地质建造单元	二级地质建造单元	地质建造类型	涉及的地质单元
I 山前平原	I-1 山前冲积平原	第四纪全新统砂砾石建造	第四系全新统
		第四纪更新统亚粘土、粉砂质粘土建造	第四系更新统
II 构造带	I-2 断陷盆地	白垩纪陆相碎屑岩建造	周家湾组
		白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造	陈棚组
	II-1 裂谷体系	侏罗纪碎屑岩建造	段集组
		石炭纪变砂质、泥质建造	花园墙组
		早古生代变基性火山-沉积建造	定远组、肖家庙岩组、刘山岩组、张家大庄岩组、大栗树岩组
		中元古代变基性火山-沉积建造	龟山岩组
	II-2 斜坡相	古元古代变泥质、砂质建造	秦岭岩群
		泥盆纪变类复理石建造	南湾岩组
II-3 裂谷体系	早古生代变基性火山-沉积建造	定远组、肖家庙岩组、刘山岩组、张家大庄岩组、大栗树岩组	
II-4 弧前盆地相	中新元古代变火山-沉积建造	浒湾组	
III 岩浆岩		古生代中酸性岩浆岩建造	古生代斜长花岗岩、石英闪长岩等
		白垩纪酸性岩浆岩建造	白垩纪二长花岗岩等

### 3.2 典型地质建造单元地质特征

下面从岩石、土壤、水文地质、地形坡度四个方面对四个典型地质建造的地质特征进行阐述。

### 3.2.1 岩石

白垩纪酸性岩浆岩建造内主要岩性为二长花岗岩。泥盆纪变类复理石建造内主体岩性为黑云（二云）变粒岩、绿帘白云（二云）石英片岩、云母片岩，以长英质岩石为主体。中元古代变基性火山-沉积建造内主要岩性为（含榴）白云（二云）石英片岩、斜长角闪片岩，以长英质岩石和角闪质岩石为主体，长英质岩石原岩为沉积岩。角闪质岩石原岩为基性火山岩。白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造主要的岩性为灰紫色安山玢岩、英安岩、流纹岩质晶屑凝灰岩、流纹质凝灰熔岩，主体为一套火山碎屑岩、熔岩组合。四个地质建造岩石具体特征见表 2。

表 2 典型地质建造类型的岩石特征

Table 2 Rock characteristics of typical formation

地质建造类型	主要岩石	岩石特征		
		结构	矿物粒径	主要矿物成分
白垩纪酸性岩浆岩建造	二长花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩	花岗岩结构-似斑状结构	2-10mm	石英含量约 29.5%、钾长石含量约 36.5%、斜长石含量约 28.5%、黑云母含量约 3%
泥盆纪变类复理石建造	黑云（二云）变粒岩、绿帘白云（二云）石英片岩、云母片岩、黑云斜长片岩、二云片岩、二云（绢云）斜长片岩	粒状鳞片状结构	<1mm	黑云（二云）变粒岩中石英含量 20-65%，斜长石含量 25-50%，黑云母 10-12%（白云母含量 10-12%）；绿帘白云（二云）石英片岩中石英含量 35-65%，长石含量 3-20%，白云母含量 10-35%（黑云母 10-15%），绿帘石 10-20%；云母片岩（包含二云片岩和黑云片岩）中石英含量 10-50%，斜长石含量 0-10%，黑云母 15-60%，白云母 3-45%。
中元古代变基性火山-沉积建造	（含榴）白云（二云）石英片岩、斜长角闪片岩、绢云石英片岩、二云石英片岩、角闪片岩	长英质岩石为鳞片粒状结构；角闪质岩石为粒柱状结构	<1mm	长英质岩石中石英含量为 40-65%，斜长石含量为 5-15%，白云母含量 10-50%（黑云母含量 10-20%）；角闪质岩石中斜长石 12-40%，角闪石含量 55-60%。
白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造	安山玢岩、英安岩、流纹岩质晶屑凝灰岩、流纹质凝灰熔岩、流纹质晶屑凝灰岩、玻屑晶屑凝灰岩	斑状结构、流纹结构、碎屑凝灰结构等	斑晶 0.1-2mm	英安岩主要由石英、斜长石、黑云母、角闪石组成，斑晶含量约 5%，基质具玻晶交织结构，由脱玻化玻璃和长石、石英微晶组成。流纹质凝灰熔岩，碎屑含量 10-40%，凝灰质由石英、钾长石、黑云母晶屑和部分玻屑组成。流纹岩质晶屑凝灰岩，碎屑呈棱角状，晶屑为黑云母、石英、钾长石、辉石和斜长石，含量约 10-15%。

### 3.2.2 土壤

白垩纪酸性岩浆岩建造内母质层厚度 0-100cm，根据数据统计主要集中于 10-25cm 之间（图 4(a)），平均约 16.7cm，以砾石土（砂质壤土）和砂土居多。土壤层厚度 2-61cm，根据数据统计主要集中于 3-13cm（图 4(b)）之间，平均约 12.2cm，质地主要为砂质壤土，其次为壤土。据野外调查约 30% 的调查点处岩石之上只发育有薄薄的一层土壤，未发育有母质层，土壤剖面一般以 A（腐殖质层）-R（基岩）和 A（腐殖质层）-C（母质层）-R（基岩）为主（图 5(a), 5(b), 6）。

泥盆纪变类复理石建造内母质层厚度 0-100cm 不等，根据数据统计主要集中于 8-20cm（图 4(c)）之间，平均约 19.9cm，野外调查点中约 42% 处母质层为砾石土（砂质壤土），其次为壤土。土壤层厚度 2-48cm（图 4(d)）不等，根据数据统计主要集中于 4-10cm，平均约 10.5cm，质地以壤土为主，其次为砂质壤土。土壤剖面以 A（腐殖质层）-C（母质层）-R（基岩）为主（图 5(c), 6）。

中元古代变基性火山-沉积建造内母质层厚度 0-236cm 不等，根据数据统计主要集中于 8-28cm（图 4(e)）之间，平均 23.8cm，母质质地有壤土、粉质壤土、粉质黏壤土。土壤层厚度 2-124cm 不等，根据数据统计主要集中于 2-12cm（图 4(f)）之间，平均约 13.1cm，质地以粉质壤土为主，其次为壤土。土壤剖面以 A（腐殖质层）-C（母质层）-R（基岩）为主（图 5(d), 6）。

白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造内母质层厚度 0-320cm 不等，根据数据统计主要集中于 10-40cm（图 4(g)）之间，平均约 27cm。土壤层厚度 3-200cm 不等，根据数据统计主要集中于 3-33cm（图 4(h)）之间，平均约 22cm。母质及土壤的质地主要为壤土。土壤剖面以 A（腐殖质层）-B（淀积层）-C（母质层）-R（基岩）及 A（腐殖质层）-E（淋溶层）-B（淀积层）-C（母质层）-R（基岩）为主（图 5(e), 5(f), 6）。

由此可见，不同地质建造内的母质层及土壤层具有不同的特征，由南向北具有渐变过渡的趋势。白垩纪酸性岩浆岩建造内土壤及母质层平均厚度最小，为 28.9cm；泥盆纪变类复理石建造内土壤层及母

质层平均厚度相较有所增加，但增加不明显，为 30.4cm；中元古代变基性火山-沉积建造内土壤层及母质层平均厚度相较增加明显，为 36.9cm；白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造内的土壤及母质层平均厚度最大，为 49cm；由山地丘陵区的白垩纪酸性岩浆岩建造向丘陵岗地区的白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造变化，土壤及母质层整体变厚。根据土工试验分析结果，白垩纪酸性岩浆岩建造内土壤中砂粒含量最高，占比为 52.7~76.1%；泥盆纪变类复理石建造内土壤砂粒含量相较有所下降，占比为 40.4~67%；中元古界变基性火山-沉积建造砂粒含量较少，占比为 9.7~36.1%；白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造内土壤中砂粒的含量有所回升，为 32.5~44.2%；由山地丘陵区的白垩纪酸性岩浆岩建造向丘陵岗地区的白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造变化，砾石的含量整体变少，土壤中砂粒的含量整体逐渐变少，在质地名称上亦有较为明显的体现。由山地丘陵区的白垩纪酸性岩浆岩建造向丘陵岗地区的白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造变化，土壤结构由 A-R 和 A-C-R 逐渐向 A-B-C-R 及 A-E-B-C-R 过渡变化，可见土壤发育成熟度越来越好。

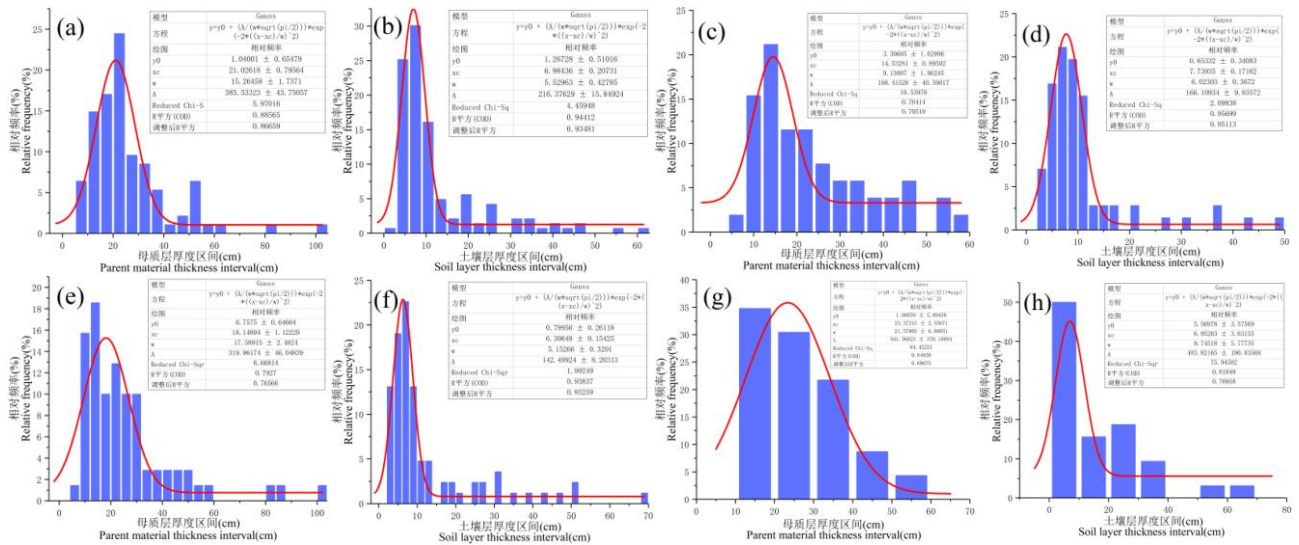
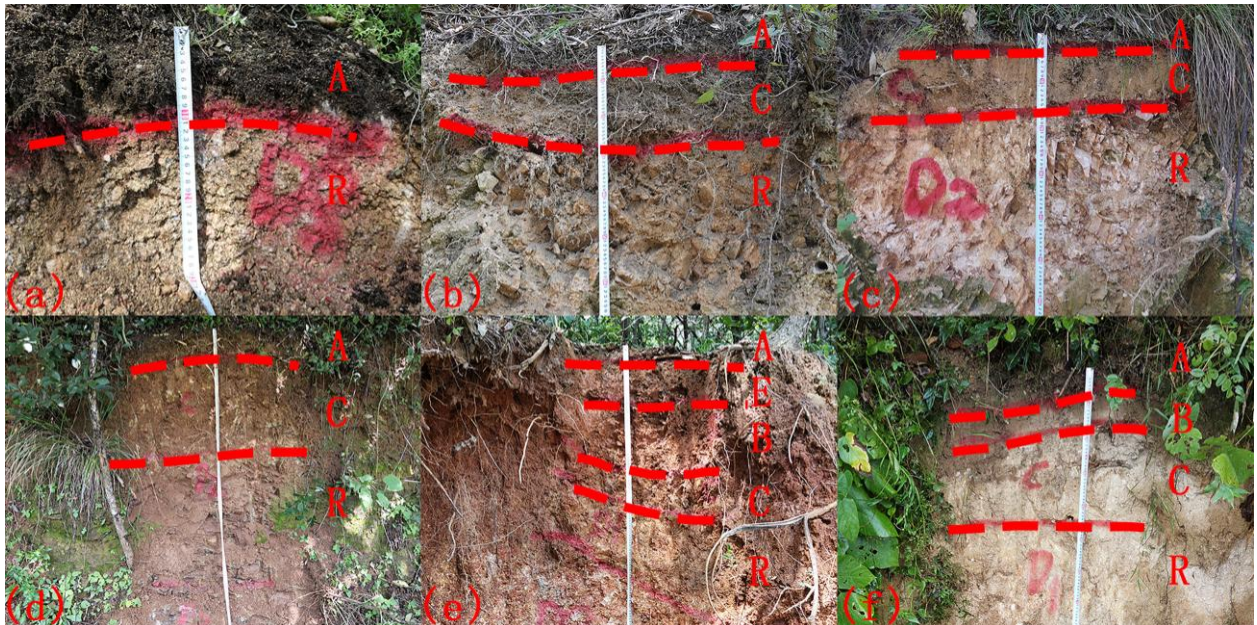


图 4 土壤厚度特征

Fig.4 Thickness characteristics of soil and soil parent material



注：野外调查过程中使用 D（传统代号）表示基岩层，D1 表示全风化层、D2 表示强风化层、D3 表示中风化层，在照片中标注时使用了 R（国际代号）来表示基岩层。

Notes: In the process of field investigation, D (traditional code) was used to represent bedrock layer, D1 was used to represent full weathering layer, D2 was used to represent strong weathering layer, D3 was used to represent medium weathering layer, and R (international code) is used to represent bedrock layer in the photos.

图 5 典型地质建造类型土壤结构发育特征

Fig.5 Characteristics of soil structure of typical formations



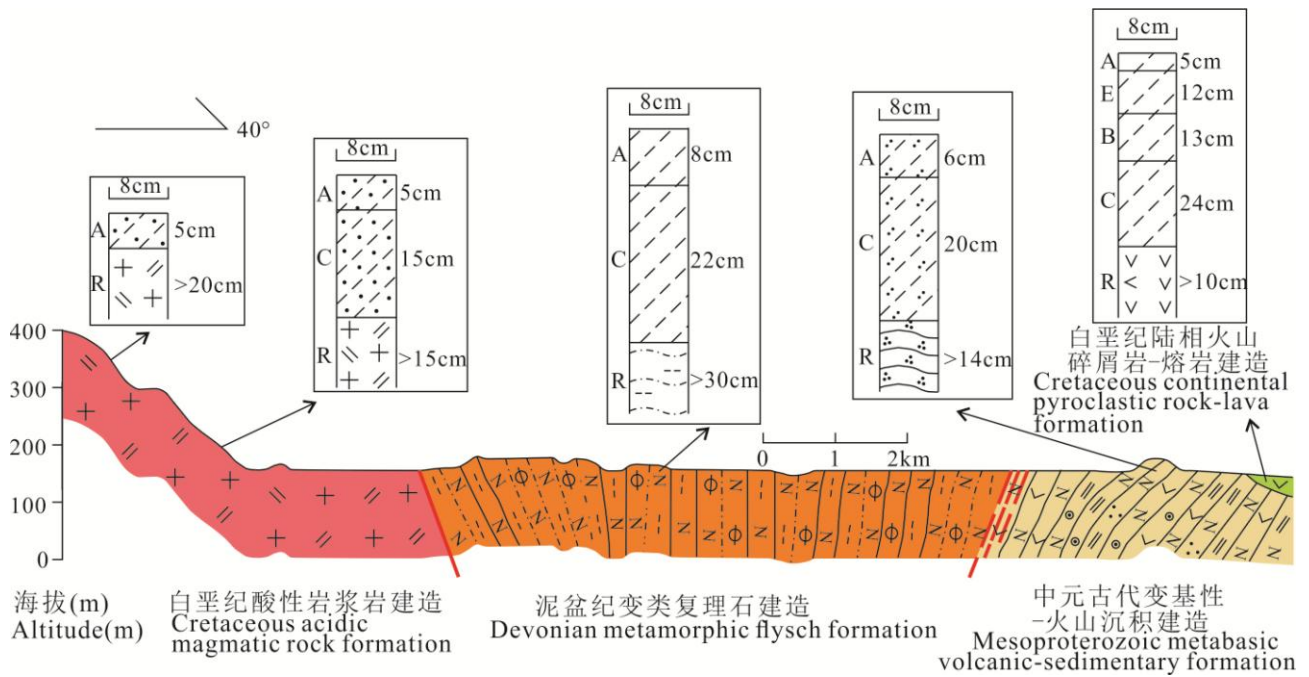


图 6 典型建造生态地质剖面简图

Fig.6 Schematic diagram of eco-geological profile of typical formations

### 3.2.3 水文地质

白垩纪酸性岩浆岩建造内水主要富存于岩石风化-构造裂隙中，泥盆纪变类复理石建造、中元古代变基性火山-沉积建造及白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造中水主要富存于岩石的风化裂隙中。本次工作对 4 个建造进行钻孔抽水试验，水文地质参数均值统计如表 3 所示。

白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造的风化裂隙水，其含水层渗透性及富水性较好，渗透系数可达 0.3099m/d，单位涌水量达  $1.409 \times 10^{-1} \text{ L/(s} \cdot \text{m)}$ ；其次是白垩纪酸性岩浆岩建造内孔隙裂隙含水层，裂隙虽发育，但裂隙开合度较小，渗透系数多为 0.19m/d 左右，渗透性为中-弱，富水性比白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造含水层稍差；中元古代变基性火山-沉积建造其渗透系数在 0.0275m/d 左右，裂隙基本不发育，渗透性和富水性较差；泥盆纪变类复理石建造变质岩风化裂隙水，风化裂隙厚度较小，其整体渗透性微-弱，渗透系数多在 0.0092m/d 左右，变质岩风化裂隙含水层渗透性及富水性相对最差。

表 3 典型地质建造类型水文地质参数表

Table 3 Hydro-geological parameters of typical formations

建造单元	含水层岩性	类型	渗透系数 k (m/d)	透水性	单位涌水量 q (L/s.m)	富水性
白垩纪酸性岩浆岩建造	二长花岗岩	风化-构造裂隙水	0.1985	中等	0.0956	中等偏小
泥盆纪变类复理石建造	黑云变粒岩、石英片岩及云母片岩	风化裂隙水	0.0092	弱透水性	$6.87 \times 10^{-5}$	偏小
中元古代变基性火山-沉积建造	石英片岩及斜长角闪片岩	风化裂隙水	0.0275	弱透水性	$1 \times 10^{-3}$	偏小
白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造	火山碎屑岩及熔岩	风化裂隙水	0.3099	较好	0.1409	中等

### 3.2.4 地形坡度

坡度主要受地形地貌控制，与地质建造密切相关。白垩纪酸性花岗岩建造位于罗山县西南部，地貌类型以低山丘陵为主，海拔在 400m 以上，最高可达 827.7m，相对高度 300m 左右，山势雄伟，山体连绵，山坡陡峭，地形起伏较大，以 15~40° 的陡坡为主；泥盆纪变类复理石建造位于罗山县中南部丘陵区，为大别山脉的延伸，海拔 200m 左右，相对高差 80 至 120m，丘顶浑圆，丘坡平缓，丘间开阔，坡度主要位于 2~12° 之间，平均约 10.7°；中元古代变基性火山-沉积建造位于罗山县中南部，与南侧泥盆纪变类复理石建造以韧性拆离断层相分割，区内海拔最高 201m，最低 60m，地貌类型主要为丘陵岗地，地势较平坦，以 2-10° 的缓坡为主，少数地区受构造挤压作用发育 30° 左右的陡坡。白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造主要多呈多数呈孤岛零星式以近东西向带状分布，海拔最高 308m，最低海拔

约 70m，地貌类型主要为丘陵岗地；坡度 1-32° 皆有发育，地形整体平缓，局部区域坡度较大，平均约 11°。

## 4 地质建造与生态特征相关性分析

地质建造是地质环境的载体，为生态系统提供物质基础，进而表现不同的生态特征。正确认识这种相关性，对于生态特征成因和机理研究至关重要，并可为生态问题的精准修复提供地质依据。生态特征的评价因子有多种，利用遥感技术对生态环境进行评价时，植被覆盖因子（NDVI）是其中最为关键的因子之一（左璐等，2021；苏玉姣等，2023；张伟等，2023；田智慧等，2023），在讨论经营模式对生态特征的影响时，多选择植被覆盖、树种、树高、胸径、平均胸高断面面积等要素对生态环境进行评价探讨（王秋丽等，2019；陆绿洲，2021），根据野外调查实际情况，本文选择树种、树高、树胸径和植被覆盖率四个因子对生态特征进行阐述及评价。由上文可知，不同的地质建造具有不同的生态特征，下面对地质建造与生态特征的相关性进行简要分析。

### 4.1 白垩纪酸性岩浆岩建造与生态特征相关性分析

白垩纪酸性岩浆岩建造主体岩性为中粗粒二长花岗岩，风化程度以强风化为主。二长花岗岩的矿物组成、粒径及风化程度决定了其上层的母质层及土壤层中包含有较多的原岩砾石及石英砾石，从母质层及土壤层的质地上可有较为直观的体现，母质层质地主要为砂土及砾石土（砂质壤土），土壤层质地为砂质壤土及壤土。地质建造内主要为低山丘陵区，地形起伏较大，水力的侵蚀作用相对明显，土壤颗粒易随水流流失，根据野外实际调查，从坡顶至坡脚土层厚度变化明显，中上坡至坡顶处土层厚度极薄（10cm 以下），局部区域见基岩裸露地表，无土层覆盖，坡脚且相对平缓的部位土层相对较厚，可见地质建造内地形地貌直接影响上层土壤层厚度及不同厚度的分布情况。土层中含有较多的原岩砾石、石英砾石及砂粒，粒间孔隙度大，透水性相对较强，保水能力相对较差，故而上层的植被多为耐旱性植被，以松树、栎树、杉树为主，整体相对较薄的土壤层影响着上层植被的树高和胸径，树高一般在 3-10m 之间，胸径 5-15cm，树木相对较细且矮小（图 7(a)）。

### 4.2 泥盆纪变类复理石建造与生态特征相关性分析

泥盆纪变类复理石建造岩性为长英质岩石，矿物粒径小于 1mm，风化程度以全风化和强风化为主，岩石节理裂隙发育，多呈碎块状，进而形成的母质层及土壤层中含有长英质砾石，相较白垩纪酸性岩浆岩建造，该地质建造内岩石中石英含量整体上升，但粒径小，岩石风化形成的土壤质地多以砾石土（砂质壤土）和壤土为主。地质建造内为丘陵岗地区，且多为缓坡，岩石中的主体矿物（石英、长石及云母）含量变化较大，抗风化能力差距较大，因岩石风化而形成的土层厚度亦有较为明显的差距，土层厚度分布差异明显影响其上层生长的植被树高亦有较大的差距，优势树种树高为 5-30m。地质建造内土层整体厚度相较于白垩纪酸性岩浆岩建造有所增大，平均为 30.4cm，土层厚度整体增大，影响该地质建造植被生长较粗，树木胸径为 13-20cm。该地质建造内主要为农林交错区，其中林地种植的植被种类受到人为的一定影响，主要植被类型有板栗树、栎树、杨树、枫杨等（图 7(b)）。

### 4.3 中元古代变基性-火山沉积建造与生态特征相关性分析

中元古代变基性-火山沉积建造主体岩性为角闪质岩石和长英质岩石，岩石风化程度不一，从全风化到中风化皆有分布，其中长英质岩石节理裂隙较发育，多呈碎块状；而角闪质岩石抗风化能力较长英质岩石差，风化程度深，多呈土状，形成的土层厚度较长英质岩石的厚。矿物颗粒为细粒，进而形成的土层质地主要为壤土、粉质壤土、粉质黏壤土，且土层整体增厚，其上生长的植被树高为 6-12m，平均胸径为 8-20cm，树种与泥盆纪变类复理石建造内的大体相同，但数量上栎树相对增多，而板栗树相对减少，地质建造内为农林交错区，林区范围进一步变小，主要的植被类型为栎树、松树、板栗树（图 7(c)）。

### 4.4 白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造与生态特征相关性分析

白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造多呈孤岛零星式出露于研究区内，为丘陵岗地区，并向平原过渡，海拔 70-308m，主体岩性为火山碎屑岩及火山熔岩，风化程度以强风化-中风化为主。岩石中矿物的结晶程度差，粒径小，风化形成的土壤中砂粒的含量较低，土壤质地以壤土为主，土壤层整体厚度在四个地质建造内最大，平均为 49cm，土壤层厚度差异亦较大，局部见极薄的土壤层（或基岩裸露），亦可

见厚度达 3m 多的土层。土壤层厚度的差异对该地质建造内植被的影响较为明显，该地质建造植被有松树、杉树、板栗树等（图 7(d)），树种树高为 4-22m，胸径为 4-45cm，可见树高及胸径差异亦非常明显。



图 7 典型地质建造单元植被特征

Fig.7 Vegetation characteristics of typical formation

综上所述，区内生长的植被以乔木为主，植被类型中乔木以松树、栎树、杉树、板栗树为主（树种顺序在前者较多，下同），其次为枫香树、杨树、盐肤木、化香树、构树、乌桕、牡荆、刺槐、臭椿树等；灌木以牡荆为主，草本植物多见白茅、野菊、一年蓬、艾草等。8 个样地统计结果表明，不同地质建造单元中植被特征有较为明显的差异（图 8，表 4），白垩纪酸性岩浆岩建造内为天然次生林，树木较多较杂，乔木可达 20 种左右，植被覆盖率为 30-70%，优势树种树高为 3-10m，胸径为 5-15cm，树木整体相对较矮小；泥盆纪变类复理石建造内以经济林为主，植被覆盖率为 50-80%，优势树种树高为 5-30m，胸径为 13-20cm；中元古代变火山-沉积建造内以经济林为主，植被覆盖率为 55-80%，优势树种平均树高为 6-12m，平均胸径为 8-20cm。白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造内以经济林为主，植被覆盖率 45-75%，优势树种树高为 4-22m，胸径为 4-45cm。从白垩纪酸性岩浆岩建造至白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造，由林业区向农林交错区演变，由天然次生林向经济林演变，植被覆盖率整体变高，树木由多样性趋于单一性，树木整体由矮小向高大过渡。

由以上分析可知，地质建造与生态特征具有紧密的相关性。地质建造控制着岩石、地形地貌、土壤及水，进而影响上层的生态环境或生态问题。对于生态环境，学者多是基于遥感技术利用遥感生态指数（RSEI）采用绿度（NDVI）、湿度（Wet）热度（LST）和干度（NDBSI）四个指标对生态环境质量评价（左璐等，2021；苏玉姣等，2023；张伟等，2023；田智慧等，2023），对于生态问题如水土流失，多是采用降雨因子、土壤侵蚀因子、坡度因子、植被覆盖因子等指标进行评价。生态环境及生态问题的评价一般未考虑地质建造这一重要的主控因素，其评价结果亦未达到理想的效果，对生态问题提出的修复建议也不具有更好的针对性。陈国光等学者从地质角度研究对水土流失的影响，并发现岩性、地形地貌等对水土流失具有控制作用，并提出了南方丘陵红壤区水土流失的成因模式，在此基础上开展的水土

流失治理取得了非常好的成效（陈国光等，2020）。地质建造影响着生态环境或生态问题，以地质建造作为背景评价生态环境或生态问题进而对生态修复提出精准建议十分必要。

表 4 典型地质建造植被特征

Table 4 Vegetation characteristics of typical formation

地质建造单元	植被类型		备注
	主要	次要	
白垩纪酸性岩浆岩建造	松树、栎树、杉树、枫香树、板栗树、杨树，其次为盐肤木、化香树、构树、乌桕等，灌木主要为牡荆，其次为胡枝子、插田泡，草本植被主要为白茅、艾草、牛筋草、一年蓬、野菊		林业区
泥盆纪变类复理石建造	板栗树、栎树、杨树	松树、杉树、枫杨、构树、刺槐、臭椿树、牡荆及草本植物	农林交错区
中元古代变基性火山-沉积建造	栎树、松树、板栗树	杨树、杉树、构树、牡荆、刺槐	
白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造	松树、杉树、板栗树	杨树、栎树、构树	

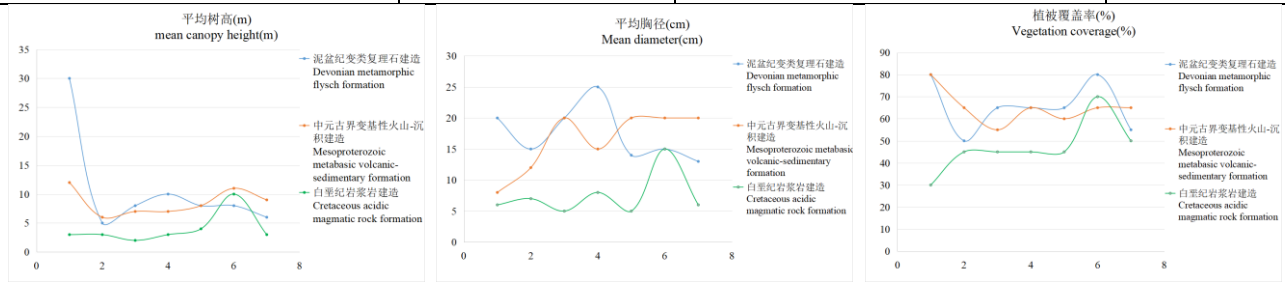


图 8 不同建造植被因子数据对比

Fig.8 Comparison of vegetation factor data of different constructions

## 5 生态环境修复应用

研究区与生态环境有关问题有水土流失、水源涵养、林地结构调整等，其中最主要的问题是水土流失。山水林田湖是一个生命共同体。水的命脉在山，山的命脉在土，土的命脉在树。山、水、树与地质建造相关性很强，只有从地质建造的角度才能正确认识生态问题的成因并为精准修复提供地质依据。以水土流失为例，其形成的物质基础是土，外动力是水，无论是外动力强度和物质基础的质地都与地质建造密切相关。我们基于地质建造的角度分析其空间分布和成因，为精准修复提供建议。

### 5.1 基于地质建造的水土流失空间分布

罗山县水土流失问题较为突出。基于通用的土壤侵蚀模型 RUSLE（阮云明等，2004；傅水龙，2016），结合区域地形、气候、土壤类型、土地利用类型和地表覆被等辅助资料，采用空间信息技术对罗山县的土壤侵蚀强度进行了估算，将罗山县水土流失等级分布图与地质建造图进行叠加，得到了罗山县水土流失空间分布图（图 9）。罗山县水土流失分布具有明显的建造空间差异性，发育最强烈区域与白垩纪酸性岩浆岩建造单元相关，水土流失率高达 50.1%，而泥盆纪变类复理石建造水土流失率仅为 13.5%（杨涛等，2023）。

### 5.2 基于地质建造的水土流失成因分析

从地质建造的角度看，白垩纪酸性岩浆岩建造是水土流失最严重的区域，原因就是该地质建造内土壤砂粒含量高（如图 10），土壤粘聚力低，抗侵蚀能力弱，地形坡度多位于 15~40°，同等条件下水力势能大，冲刷能力强，且植被覆盖率、平均树高和胸径等植被因子相比较低（如图 8），对水土的保持能力相对较弱而导致；泥盆纪变类复理石建造和中元古界变基性火山-沉积建造土壤砂粒含量相比更低，土壤粘聚力大，抗侵蚀能力强，地形较平坦，斜坡多为 2~12° 的缓坡，水力势能小，冲刷力弱，且植被覆盖率高，平均树高和胸径等植被因子相比较大，对水土的保持能力较强。由此可见，不同地质建造的土壤结构、植被因子和地形坡度对罗山地区水土流失强度及空间分布有着重要影响（杨涛等，2022）。

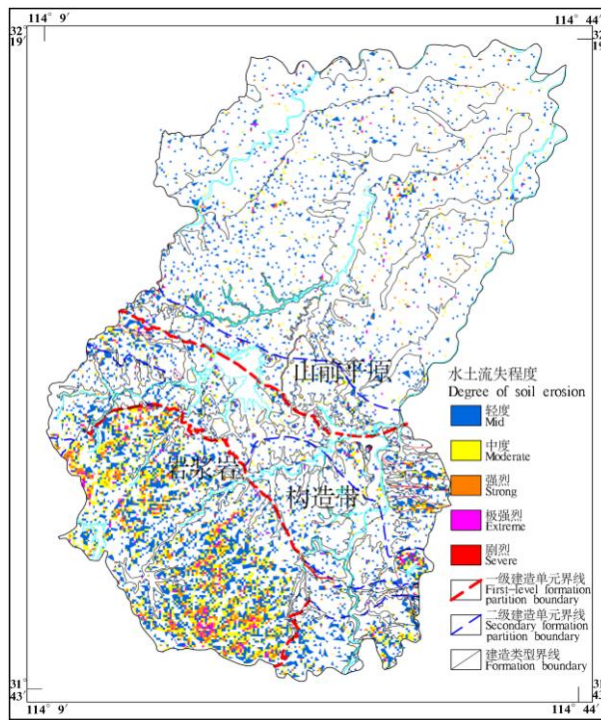


图9 罗山县水土流失空间分布图

Fig.9 Spatial distribution of soil and water loss in Luoshan

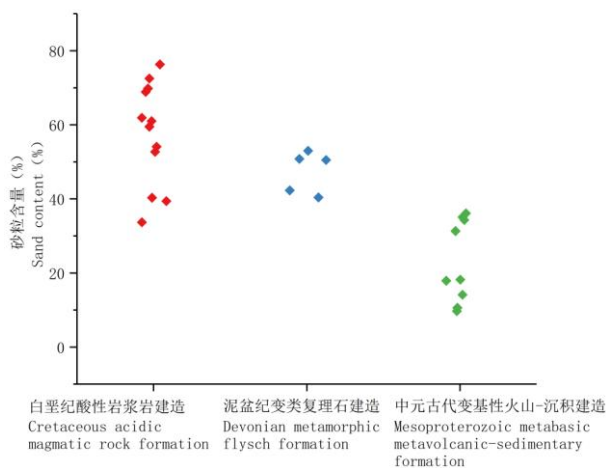


图10 典型地质建造类型中土壤砂粒含量

Fig 10 Soil sand content of typical formation

### 5.3 基于地质建造的水土流失精准修复建议

白垩纪酸性岩浆岩建造及泥盆纪变类复理石建造水土流失形成鲜明对比，其本质原因在于地质建造的不同。作为对照，我们基于地质建造提出如下修复建议。

白垩纪酸性岩浆岩建造，根据野外实地调查，发现部分区域存在在山坡上将林地更改为坡耕地或园地，因此该地质建造区内建议首先要加强林区的保护，尤其是坡度大于 $15^{\circ}$ 以上坡地，禁止变更土地利用类型；其次土壤中砂含量较高，且土壤层整体较薄，降雨亦渗透流失，且以天然次生幼林为主，建议部分区域可进行封山育林，对于植被稀疏的区域可通过人为干预，补种耐干旱且根系发达的植被，比如落叶松、针毛蕨等，通过这类植被来增强该地质建造内的固土能力，减少土壤中粉黏粒的流失，增加土壤的水源涵养能力；在水土流失相对严重的区域，可设置沉沙区域，修建水利工程。对于该地质建造内山坡中存在的坡耕地及茶园地区，建议坡度大于 $15^{\circ}$ 的地区，退耕（园）还林，减少人为干扰，减少水土流失。

泥盆纪变类复理石建造相对于白垩纪酸性岩浆岩建造土壤层厚度增加，坡度相对较缓，土壤砂粒含量降低，林区植被覆盖率增大，水土流失相对较低。该地质建造为亦为典型的农林交错区，对于农业区

建议加强坡耕地治理和农田防护林网建设,做好水库、河流等河道整治,提升其防洪能力;对于林区,对原有天然次生林以封育保护为主,对经济林加强人为的管控维护,修建护坡等工程,进一步降低水土流失。

## 6 结论

(1) 研究区划分出 13 个地质建造类型:第四纪全新统砂砾石建造,第四纪更新统亚粘土、粉砂质粘土建造,白垩纪陆相碎屑岩建造,白垩纪陆相火山碎屑岩-熔岩建造,侏罗纪碎屑岩建造,石炭纪变砂质泥质建造,早古生代变基性火山-沉积建造,中元古代变基性火山-沉积建造,古元古代变泥质砂质建造,泥盆纪变类复理石建造,中新元古代变火山-沉积建造,古生代中酸性岩浆岩建造,中生代岩浆岩建造。

(2) 地质建造与生态特征相关性较强,各建造单元都有其独特的生态地质特征。从山地丘陵区到丘陵岗地区,由林区向农林交错区变化,树木从多样性向单一性变化,树木整体逐渐变高,胸径变大。土层整体变厚,其砾石含量及砂的含量逐渐变少,因此土壤质地由砾石土(砂质壤土)、砂质壤土、粉质壤土、壤土逐渐变化。

(3) 基于地质建造分析,水土流失等环境问题与地质建造内的地形坡度、岩石的矿物组成、矿物粒度有直接的关系,根据这些关系可以提供精准修复方案。

(4) 基于地质建造分析生态特征及成因机理、提出环境修复建议具有较好的针对性和应用前景,能够很多体现地质对生态的约束,为生态保护修复提供地质依据。

致谢:

本文数据来源于《大别山区西段生态修复支撑调查》项目(项目编号 DD20208074),同时感谢中国地质调查局南京地质调查中心刘红樱研究员对文章的指导与帮助以及审稿专家及编辑部对本文提出的宝贵意见。

### 注释:

- ①彭练红.麻城市幅 H50C001001 1/25 万区域地质调查报告[R].湖北:湖北省地质调查院,2003.  
涩港幅 H-50-1-B 1/5 万地质图及说明书[R].河南:郑州地校区调队,1993.  
周党镇幅 H-50-2-A 1/5 万地质图说明书[R].河南:河南省地矿厅第 3 地调队,1991.  
信阳市幅 I50E024001 1/5 万地质图说明书[R].河南:河南省地矿厅第 3 地质调查队,1996.  
千斤河棚幅 H50E002003 1/5 万地质图说明书[R].河南:河南省地质矿产勘查开发局第 3 地质调查队,1996.  
李家寨幅 H50E001001 1/5 万地质图说明书[R].河南:河南省地矿厅第 3 地质调查队,1996.  
中国地质调查局,固体矿产地质调查技术要求(1:50000)(DD2019-02),2019.
- ②中国地质调查局,固体矿产地质调查技术要求(1:50000)(DD2019-02),2019.

### References

- Chen Guoguang, Liu Hongying, Chen Jinquan,Zhang Xiaolong, Zhan Long. 2020. Geological influence factors of soil erosion in Changting County, Fujian Province and the countermeasures to prevent and control[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 47(6): 26-35(in Chinese with English abstract).
- Chen Shuwang, Zheng Yuejuan, Duan Ruiyan. 2011. Eco-geological research in Tieling area[M]. Beijing: Geological Press(in Chinese).
- Chen Shuwang, Xing Dehe, Ding Qihong, Zheng Yuejuan, Gao Fei, Bian Xiongfei, Zhang Zhibin, Shang Ling, Antonina A. Zhukovskaya, Irina V. Ershova, Nadezhda A. Tomilovskaya. 2012. Ecogeological survey and evaluation: a case study of Tieling Area, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 21(6): 540-545(in Chinese with English abstract).
- Chen Yunming, Liu Guobin, Zheng Fenli, Zhang Wei. 2004. Proceeding and Application on Soil Erosion Model of RUSLE[J]. Research of Soil and Water Conservation, 11(4): 80-83(in Chinese with English abstract).

- Geological dictionary office of geology and mineral resources ministry. 2005. Geological Dictionary[M]. Beijing: Geological Press(in Chinese).
- Dong Jianhua, Zhao Weiming, Zhao Keli, Hu Junjing, Li Hao, Yuan Ziqian, Lei Yichen. 2018. Factor analysis of soil fertility under different geological background conditions in *Carya cathayensis* plantation[J]. *Nonwood Forest Research*, 36(4): 52-58(in Chinese with English abstract).
- Fu Shuilong, Liang Juanzhu, Huang Luping. 2016. Assessment of Soil and Water Loss in Changting County Based on RUSLE Model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 36(1): 196-200(in Chinese with English abstract).
- Hahm W. Jesse, Rempe Daniella M, Dralle David N, Dawson Todd E, Lovill Sky M, Bryk Alexander B, Bish David L, Schieber Juergen, Dietrich William E. 2019. Lithologically controlled subsurface critical zone thickness and water storage capacity determine regional plant community composition[J]. *Water Resources Research*, 55(4): 3028-3055.
- Hahm W Jesse, Riebe Clifford S, Lukens Clair E, Araki, Sayaka. 2014. Bedrock composition regulates mountain ecosystems and landscape evolution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9): 3338-3343.
- He Zhengwei, Sun Chuanmin, Wu Baiqing, Wu Hua, Fan Minghui, He Fenqin, Han Lingling. 2002. Discussion on the establishment of Rock-Soil-Vegetation in formation system[J]. *Mineralogy and Petrology*, 22(2): 100-104(in Chinese with English abstract).
- Huang Huiqian, He Tengbing, Mou Li. 2016. Effects of parent rock (parent material) on soil types and distribution in Guizhou[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 57(11): 1816-1820(in Chinese).
- Jia Lei, Liu Hong, Ou Yangyuan, Zhang Wei, Dou Lei, Liu zining, Mo bin, Chen en, Zhang Tengjiao. 2022. Division scheme of surface substrate mapping units of mountainous-hilly area in south china based on geological formations research: example by Xinhui-Taishan area in Pearl River Delta[J]. *Northwestern Geology*, 55(4): 140-157(in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Huang Hanxiao, Ou Yangyuan, Zhang Jinghua, Zhang Tengjiao, Li Fu, Xiao Qiliang, Zeng Jian, Hou Qian, Wen Dengkui, Duan Shengyi. 2020. Soil's geologic investigation in Daliangshan, Xichang, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(1): 91-105(in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Li Wenchang, Ouyang Yuan, Zhang Jinghua, Zhang Tengjiao, Li Youguo, Huang Hanxiao, Huang Yong, Li Fu, Chen Minhua, Li Tong, Wu Junyi. 2023. Exploration and practice of compilation of ecological geology series maps based on geological formation sresearch, mountainous region in Southwest China — Exemplified by Qionghai-Lushan area, western margin of the Yangtze block. *Acta Geologica Sinica*, 97(2): 623~638(in Chinese with English abstract).
- LIU Zi, Huang Xingkai, XU Hongling, Zhang Bin, Peng Qingsong, Wang Chensheng, Wang Heng, Jiang Hua. 2020. Migration characteristics of elements in the rock-soil system and suitability evaluation of orange planting in Yaqueling area, Yichang, Hubei Province[J]. *Geology in China*, 47(6): 1853-1868(in Chinese with English abstract).
- Lu Lvzhou. 2021. Effects of different forest management modes on stand structure and ecological characteristics[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 16: 144-145(in Chinese).
- Lukasz Pawlik, Jonathan D Phillips, Pavel Samonil. 2016. Roots, 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.
- Nie Hongfeng, Xiao Chunlei, Ren Weixiang, Liu Jianyu, Dai Meng. 2021. Progress and prospect of ecogeological research[J]. *Geological Survey of China*, 8(6): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Nie Hongfeng, Xiao Chunlei, Dai Meng, Liu Jianyu, Shang Boxuan, Guo Zhaocheng, He Peng, Ou Yangyuan, Lei Tianci, Li Wenming, Zhou Chuanfang, Jiang Qigang. 2021. Progresses and main achievements of ecogeological survey project[J]. *Geological Survey of China*, 8(1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- Ouyang Yangyuan, Zhang Jinghua, Liu Hong, Huang Hanxiao Zhang Tengjiao, Huang Yong. 2021. Classification of soil parent materials in mountain areas of Southwest China based on geological formations: A case study of Daliangshan region[J]. *Geological Survey of China*, 8(6): 50-62(in Chinese with English abstract).
- Peng Sanguo, Peng Lianhong, Zhu Jiang, Deng Xin. 2018. Progress and results integration of geological and mineral survey in Wudang-Tongbai-Dabie metallogenic belt during the 12th Five-Year Plan period[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).

- Su Yujiao, Zhang Peng, Zhang Xiaohua, Zhao yanli, Li Liangtao. 2023. Ecological environment quality evaluation and driving factor analysis of Wu'an national forest park in Hebei province[J]. Journal of Hebei University(Natural Science Edition), 43(2): 197-206(in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Sun Xiaoming, Jia Fengchao, Wang Yanli, Li Duojie, Li Jian. 2020. The eco- geochemical characteristics of germanium and its relationship with the genuine medicinal material *Scutellaria baicalensis* in Chengde, Hebei Province[J]. Geology in China, 47(6):1646-1667(in Chinese with English abstract).
- Sun Yongcheng. 2018. Investigation and Evaluation of Reverbank-stability in LuoShan County[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing): 1-58(in Chinese with English abstract).
- Tian Zhihui, Yin Chuanxin, Wang Xiaolei. 2023. Dynamic Monitoring and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Poyang Lake Basin[J]. Environmental Science, 44(2): 816-827(in Chinese with English abstract).
- Wang Changsheng, Wang Dake. 1997. On the 1:50000 Ecological Geological Investigation[J]. Regional Geology of China, 16(1): 56-59(in Chinese with English abstract).
- Wang Changsheng, Wang Dake. 1998. Production of Ecological Geology and its Applications in the Daba Mountain[J]. Exploration of Nature, 17(66): 68-70(in Chinese with English abstract).
- 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).
- Wang Qiuli, Zhang Ganggang. 2019. The Effect of Different Forest Management Models on the State of the *Quercus aliena* var. *acuteserrata* Secondary Forest[J]. Journal of West China Forestry Science, 48(2):151-158(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhenli, Zhang Dongmei, Hu Shengming, Wang Rixin. 2016. Eco-geology[M]. Beijing: Geological Press(in Chinese).
- Wei Xiaofeng, Sun Houyun, He Xinze, Jia Fengchao, Li Jian, Li Duojie. 2019. Exploration on the evaluation of eco-environmental geological survey in shallow mountainous areas - - A case study of Chengde ecological civilization construction demonstration area[A]. Chinese society for mineralogy petrology and geochemistry. Abstracts of the 17th Annual Academic Conference of Chinese society for mineralogy petrology and geochemistry[C]. Chinese society for mineralogy petrology and geochemistry, 633-634(in chinese).
- Wei Xiaofen, Fan Liuyang, Sun Zijian, He Zexin, Sun Houyun, Wei Hao. 2020. The influence of geological formation on plant community composition in Chaibai River Basin, Chengde, Hebei Province[J]. Geology in China, 47(6): 1869-1880(in Chinese with English abstract).
- Wei Xiaofeng, Sun Houyun, Zhang Jing, Li Xia, Fan Liuyang, He Zexin. 2020. Eco-geochemical process of characteristic forest fruit resources and its significance of quality improvement in Chengde City[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 47(6): 99-108(in Chinese with English abstract).
- Wei Xiaofeng, Wang Jingbin, Sun Houyun, Yin Zhiqiang, He Zexin, Jia Fengchao, Li Xia, Liu Hong Wei, Zhang Jing. 2020. Exploration of land use optimization path based on geological formation in Chengde City[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 47(6): 15-25(in Chinese with English abstract).
- Wu Cifang. 1992. The relationship between regional geological conditions and the distribution of soil trace elements in Zhejiang Province and its significance in the classification of soil parent material types[J]. Chinese Journal of Soil Science, 23(2): 61-63(in chinese).
- Yan Mingshu, Huang Jian, He Zhongxiang, Bao Liran, Luo Yujie. 2018. The influence of geological background on trace elements of soil, A case study of Yubei area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 42(1): 199-205, 219(in Chinese with English abstract).
- Yang Tao, Dong Haogang, Li Xin, Luo Mingxuan, Wu Feng, Huang Jinyan, Xiexiang. 2022. Characteristics and influencing factors of soil erosion in Luoshan County, He'nan Province based on geological formation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 42(5): 151-157, 180(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fengrong. 2021. Accelerating the investigation of surface substrate in mountainous areas and serving land remediation and ecological restoration[N], China Natural Resources News(in Chinese).



- Zhang Wei, Du Peijun, Guo Shanchuan, Lin Cong, Zheng Hongrui, Fu Pingjie. 2023. Enhanced remote sensing ecological index and ecological environment evaluation in arid area[J]. National Remote Sensing Bulletin, 27(2): 299-317(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tengjiao, Liu Hong, Ou Yangyuan, Zhang Jinghua, Zhang Zhenjie, Li Tong. 2021. Ecological environment function of different geological formations: A case study of Xichang area[J]. Geological Survey of China, 8(6): 35-49(in Chinese with English abstract).
- Zuo Lu, Sun Leigang, Xu Quanhong, Liu Jianfeng, Li Xiaojing, Lu Junjing,. 2021. A review of the studies on regional ecological environment evaluation[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 43(4): 806-817(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

- 陈国光, 刘红樱, 陈进全, 张晓东, 湛龙. 2020. 福建长汀县水土流失的地质影响因素及防治对策[J]. 水文地质工程地质, 47(6): 26-35.
- 陈树旺, 郑月娟, 段瑞炎. 2011. 铁岭地区生态地质研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈树旺, 邢德和, 丁秋红, 郑月娟, 高飞, 卞雄飞, 张志斌, 商翎, Antonina A. Zhukovskaya, Irina V. Ershova, Nadezhda A. Tomilovskaya. 2012. 生态地质调查评价—以辽宁铁岭地区为例[J]. 地质与资源, 21(6): 540-545.
- 陈云明, 刘国彬, 郑粉莉, 张卫. 2004. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J]. 水土保持研究, 11(4): 80-83.
- 地质矿产部地质辞典办公室. 2005. 地质大辞典[M]. 北京: 地质出版社.
- 董建华, 赵伟明, 赵科理, 胡俊靖, 李皓, 袁紫倩, 雷亦晨. 2018 基于地质背景的山核桃林地土壤肥力因子分析[J]. 经济林研究, 36(4): 52-58.
- 傅水龙, 梁娟珠, 黄路平. 2016. 基于 RUSLE 模型的长汀县水土流失评估[J]. 水土保持通报, 36(1): 196-200.
- 何政伟, 孙传敏, 吴柏青, 吴华, 樊明辉, 贺奋勤, 韩玲玲. 2002. 岩石-土壤-植被信息系统建立探讨[J]. 矿物岩石, 22(2): 100-104.
- 黄会前, 何腾兵, 牟力. 2016. 贵州母岩(母质)对土壤类型及分布的影响[J]. 浙江农业科学, 57(11): 1816-1820.
- 贾磊, 刘洪, 欧阳渊, 张伟, 窦磊, 刘子宁, 莫滨, 陈恩, 张腾蛟. 2022. 基于地质建造的南方山地-丘陵区地表基质填图单元划分方案—以珠三角新会—台山地区为例[J]. 西北地质, 55(4): 140-157.
- 刘洪, 黄瀚霄, 欧阳渊, 张景华, 张腾蛟, 李富, 肖启亮, 曾建, 侯谦, 文登奎, 段声义. 2020. 基于地质建造的土壤地质调查及应用前景分析—以大凉山区西昌市为例[J]. 沉积与特提斯地质, 40(1): 91-105.
- 刘洪, 李文昌, 欧阳渊, 张景华, 张腾蛟, 李佑国, 黄瀚霄, 黄勇, 李富, 陈敏华, 李槌, 吴君毅. 2023. 基于地质建造的西南山区生态地质编图探索与实践——以邛海—庐山地区为例[J]. 地质学报, 97(2): 623-638.
- 刘孜, 黄行凯, 徐宏林, 张斌, 彭青松, 王晨昇, 王恒, 姜华. 2020. 湖北宜昌鹤鹑岭地区岩石土壤元素迁移特征及柑橘种植适宜性评价[J]. 中国地质, 47(6): 1853-1868.
- 陆绿洲. 2021. 不同森林经营模式对林分结构与生态特征的影响[J]. 现代农业科技, 16: 144-145.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 任伟祥, 刘建宇, 戴蒙. 2021. 生态地质研究进展与展望[J]. 中国地质调查, 8(6): 1-8.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 戴蒙, 刘建宇, 尚博譔, 郭兆成, 贺鹏, 欧阳渊, 雷天赐, 李文明, 周传芳, 姜琦刚. 2021. 生态地质调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查, 8(1): 1-12.
- 欧阳渊, 张景华, 刘洪, 黄瀚霄, 张腾蛟, 黄勇. 2021. 基于地质建造的西南山区成土母质分类方案—以大凉山区为例[J]. 中国地质调查, 8(6): 50-62.
- 彭三国, 彭练红, 朱江, 邓新. 2018. 武当-桐柏-大别成矿带地质矿产调查“十二五”进展与成果集成[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 苏玉姣, 张鹏, 张晓华, 赵艳丽, 李良涛. 2023. 河北武安国家森林公园生态环境质量评价及驱动因子分析[J]. 河北大学学报(自然科学版), 43(2): 197-206.
- 孙厚云, 孙晓明, 贾凤超, 王艳丽, 李多杰, 李健. 2020. 河北承德锆元素生态地球化学特征及其与道地药材黄芩适生关系[J]. 中国地质, 47(6): 1646-1667.
- 孙成永. 2018. 河南省罗山县主要河流岸坡稳定性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-58.

- 田智慧,尹传鑫,王晓蕾. 2023. 鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析[J]. 环境科学, 44(2):816-827.
- 王长生,王大可. 1997. 试论 1:5 万生态地质调查[J]. 中国区域地质, 16(1): 56-59.
- 王长生,王大可. 1998. 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, 17(66): 68-70.
- 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.
- 王秋丽,张岗岗. 2019. 森林经营模式对锐齿栎次生林林分状态的影响[J]. 西部林业科学, 48(2): 151-158.
- 汪振立,张冬梅,胡盛明,王日鑫. 2016. 生态地质学[M]. 北京:地质出版社.
- 卫晓锋,孙厚云,何新泽,贾凤超,李建,李多杰. 2019. 浅山区生态环境地质调查评价探索—以承德市生态文明建设示范区为例[A].中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文摘要集[C]. 中国矿物岩石地球化学学会, 633-634.
- 卫晓锋,樊刘洋,孙紫坚,何泽新,孙厚云,魏浩. 2020. 河北承德柴白河流域地质建造对植物群落组成的影响[J]. 中国地质, 47(6): 1869-1880.
- 卫晓锋,孙厚云,张竞,李霞,樊刘洋,何泽新. 2020. 承德特色林果资源的生态地球化学过程及其品质提升意义[J]. 水文地质工程地质, 47(6): 99-108.
- 卫晓峰,王京彬,孙厚云,殷志强,何泽新,贾凤超,李霞,刘宏伟,张竞. 2020. 基于地质建造探索承德市土地利用优化路径[J]. 水文地质工程地质, 47(6): 15-25.
- 吴次芳. 1992. 浙江省区域地质条件与土壤微量元素分布的关系及其在成土母质类型划分上的意义[J]. 土壤通报, 23(2): 61-63.
- 严明书,黄剑,何忠庠,鲍丽然,罗宇洁. 2018. 地质背景对土壤微量元素的影响—以渝北地区为例[J]. 物探与化探, 42(1): 199-205, 219.
- 杨涛,董好刚,李新,罗敏玄,吴丰,黄锦彦,谢翔. 2022. 基于地质建造的河南省罗山县水土流失特征及其影响因素研究[J]. 水土保持通报, 42(5): 151-157, 180.
- 张凤荣. 2021. 加快山区地表基质调查服务土地整治生态修复[N]. 中国自然资源报.
- 张伟,杜培军,郭山川,林聪,郑鸿瑞,付萍杰. 2023. 改进型遥感生态指数及干旱区生态环境评价[J]. 遥感学报, 27(2): 299-317.
- 张腾蛟,刘洪,欧阳渊,张景华,张振杰,李槿. 2021. 不同地质建造类型的生态环境功能特征—以西昌地区为例[J]. 中国地质调查, 8(6): 35-49.
- 左璐,孙雷刚,徐全洪,刘剑锋,李晓婧,鲁军景. 2021. 区域生态环境评价研究综述[J]. 云南大学学报(自然科学版), 43(4): 806-817.