

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

杨涛, 董好刚, 李新, 罗敏玄, 吴丰, 黄锦彦, 谢翔

(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: [目的] 分析各地质建造单元的水土流失情况与生态地质特征之间的关系, 为河南省罗山县水土流失防治规划与修复提供参考。[方法] 基于修正的通用水土流失方程(RUSLE), 利用遥感和 GIS 手段对河南省罗山县主要建造单元的水土流失的情况进行计算和统计, 查清水土流失强度及面积; 从地质建造及特征角度分析典型建造水土流失的影响因素。[结果] ① 由于形成时代、物质成分、地质背景不同, 各建造单元生态地质特征存在差异; ② 罗山县水土流失分布具有明显的建造空间差异性, 白垩纪酸性岩浆岩建造单元水土流失率高达 50.1%, 泥盆纪变类复理石建造水土流失率仅为 13.5%。[结论] 土壤结构、植被因子、地形坡度是影响水土流失分布差异的重要因素, 在制定水土流失与修复规划时, 应重点考虑相关因素。

关键词: 地质建造; 水土流失; 影响因素; 河南省罗山县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0151-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 杨涛, 董好刚, 李新, 等. 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, 2022, 42(5): 151-157. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.019; Yang Tao, Dong Haogang, Li Xin, et al. Characteristics and influencing factors of soil erosion in Luoshan County, He'nan Province based on geological formation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 151-157.

Characteristics and Influencing Factors of Soil Erosion in Luoshan County, He'nan Province Based on Geological Formation

Yang Tao, Dong Haogang, Li Xin, Luo Minxuan, Wu Feng, Huang Jinyan, Xie Xiang

(Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Changsha, Hu'nan 410600, China)

Abstract: [Objective] The relationship between soil erosion of each formation unit and ecological geological characteristics was analyzed in order to provide a reference for soil erosion prevention and for control planning and restoration in Luoshan County, He'nan Province. [Methods] Based on the revised universal soil loss equation (RUSLE), soil erosion of main formation units in Luoshan County was calculated and counted by means of remote sensing and GIS, and the intensity and the area of soil erosion was determined. The influencing factors of soil erosion in a typical formation were then discussed from the perspectives of geological formation and characteristics. [Results] ① Due to differences in formation times, material compositions, and geological backgrounds, the eco-geological characteristics of each formation unit were different; ② The distribution of soil erosion in Luoshan County had obvious spatial differences. The soil erosion rate of the cretaceous acid magmatic rock formation unit was as high as 50.1%, while the soil erosion rate of the devonian metamorphic flysch formation unit was only 13.5%. [Conclusion] Soil structure, vegetation factors, and terrain slopes were important factors affecting the differences in soil erosion distribution, which should be considered in the planning of soil erosion prevention and rehabilitation.

Keywords: geological formation; soil erosion; influence factors; Luoshan County of He'nan Province

大别山是淮河中游、长江下游重要的水源补给区, 也是国家重要的水土流失防治生态功能区, 河南

省罗山县位于大别山北麓, 是大别山重要的组成部分, 21 世纪以来, 由于现代化、城镇化、工业化的快速

收稿日期: 2022-04-01

修回日期: 2022-04-19

资助项目: 中国地质调查局项目“大别山区西段生态修复支撑调查”(DD20208074)

第一作者: 杨涛(1990—), 男(汉族), 江西省上饶市人, 硕士, 工程师, 主要从事生态地质调查与研究。Email: 1164825885@qq.com。

通信作者: 董好刚(1970—), 男(汉族), 山东省青州市人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事生态及环境地质研究。Email: 645226820@qq.com。

推进,罗山县生态环境遭到了一定程度的破坏,水土流失已成为罗山县重要的生态问题之一,流失面积曾占全县总面积的 57%,中度以上达 949 km²。近年来,在上级主管部门指导下,以保水保土为目标,以小流域治理为重点,先后完成了前锋、冲口等 10 余条小流域的治理任务,使水土流失面积下降到 409 km²,生态环境得到了极大改善,但生态问题仍然严峻,且生态环境保护与经济建设矛盾突出,特别是在贫困山区,边治理边破坏的情况时有发生,水土保持工作仍不容乐观。

水土流失特征及其影响因素分析是生态环境保护和治理的关键问题。当前,国内对于水土流失的研究已经形成了较为完善的科学体系^[1-2]。在水土流失动态监测方面,基于遥感和土壤侵蚀方程 RUSLE 计算模型使水土监测更为简便^[3-4],对及时掌握水土流失的动态变化有着重要的作用。在坡面侵蚀机理研究方面也取得了一定的进展^[5],对水土保持和治理起到了较为积极的作用,但多从植被覆盖度、降雨侵蚀因子、土地利用类型等因子研究与水土流失的相关性,从地质建造入手研究水土流失特征及影响因素的较少,导致水土流失防治效果与预期相差较大。地质建造是人类活动过程中较为稳定的自然本底条件,其形成时代、物质组成、地形地貌不同,表现不同的生态地质特征,产生生态地质问题的潜力和规律也不同。在生态地质调查中,以地质建造为基础,利于快速筛选和突出生态地质问题的集中分布区域,对研究生态环境问题的特点具有重要作用^[6]。

本文以地质建造为基础,将罗山县划分为若干建造单元,通过分析各建造单元的水土流失情况与生态地质特征之间的关系,进一步研究水土流失的内在因素,以为罗山县水土流失防治规划与修复提供参考。

1 研究区概况

罗山县(114°10′—114°42′E, 31°44′—32°19′N)隶属于河南省信阳市,位于河南省南部,大别山北麓,淮河南岸,属北亚热带大陆性季风湿润气候,全县年平均降水量为 1 149.7 mm,自南而北渐次递减,北部县城年降水量 1 036.5 mm,平均雨日 114 d,四季分明,雨热同季,夏季多暴雨,秋季多旱涝。

罗山县南靠大别山,地势西南高,东北低,南部山势雄伟,山体连绵,山坡陡峭,沟谷深邃,中南部丘陵浑圆,丘坡平缓,丘间开阔,北部为冲积平原,地势平坦(图 1)。

由于南北地形和气候存在差异,植物种类分布也有差别,南部低山区以常绿叶阔林为主的草、灌丛植

被区;中部丘陵区以马尾松、杉木林和松栎混交林为主的黄背、白茅、狗牙根植被区;北部平原区以农业为主的湿生、半湿生植物植被区。

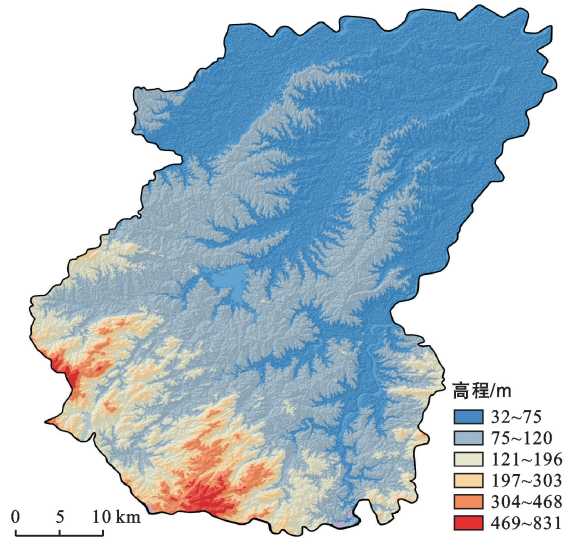


图 1 河南省罗山县地形地貌

2 研究方法

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^[7]。地质建造类型不同,其形成环境、岩石矿物组合、地球化学背景、水文地质、地质灾害等基本特征和发育规律也不同^[8]。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^[9]。王京彬等^[6]认为生态地质环境的形成始于地表岩石的风化成土演化,即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。本文以地质建造为基础,通过分析各建造单元的水土流失情况与生态地质特征之间的关系,进而探讨水土流失的影响因素。

2.1 地质建造分区

研究区已有良好的基础地质工作,包括 1:50 000 区域地质调查和水工环调查等^[10]。本文以服务生态调查和研究为目的,参考上述基础资料,根据工作区不同时期的岩性组合(沉积岩、变质岩、岩浆岩)、形成时代(古元古到新生代)及构造演化特点(沉积作用、构造运动、岩浆活动),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 个一级建造单元,7 个二级建造单元,13 个建造类型(图 2)。一级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 个二级建造单元,构

2.3 水土流失强度及分布特征分析

罗山县水土流失问题较为突出,是区内典型的生态地质问题之一,为此,查清区内水土流失强度等级,掌握水土流失的空间分布对研究水土流失的影响因素及后期的修复治理具有重要的意义。

基于通用的土壤侵蚀模型 RUSLE^[13-17],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,得出罗山县年平均侵蚀模数为 642.03 t/(km²·a),单从数据来看,水土流失总体并不严重,根据水利部的土壤侵蚀强度分类分级标准(SL190-2007)^[18],属于轻度水土流失,但从分布来看,罗山县水土流失主要集中在南部丘陵山地区,北部平原区水土流失面积较少且多以轻微流失等级为主。可知,罗山县水土流失总体较轻,但局部严峻,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结果,水土流失主要发生在岩浆岩建造,构造带次之,山前平原最少,且中度以上等级的水土流失主要集中在岩浆岩建造。

由表 2 可知,白垩纪酸性岩浆岩建造水土流失面积为 203.23 km²,占该建造总面积 405.98 km² 的 50.1%,其中中度等级以上水土流失面积为 102.38 km²,占总面积的 25.2%,是水土流失最为严重的建造单元;泥盆纪变类复理石建造水土流失情况最轻,流失面积为 18.36 km²,流失率为 13.5%,中度等级以上水土流失面积为 4.3 km²,占该建造面积的 3.2%;中元古代变基性火山—沉积岩建造水土流失面 20.92 km²,流失率为 20.5%,中度等级以上水土流失面积为 6.41 km²,占该建造面积的 6.3%,处于平均水平。受地质建造控制,水土流失的空间分布有着明显的差异。

表 2 罗山县主要建造单元水土流失情况

地质建造类型	不同等级水土流失面积/km ²					总面积/km ²	流失率/%
	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈		
白垩纪酸性岩浆岩	101.12	64.13	27.57	9.38	1.03	405.98	50.1
中新元古代变火山—沉积	10.94	2.97	1.00	0.10	0.01	57.66	26.1
早古生代变基性火山—沉积	6.62	1.19	0.71	0.12	0.13	47.37	20.1
泥盆纪变类复理石	14.04	3.00	0.83	0.43	0.04	136.40	13.5
中元古代变基性火山—沉积	14.51	4.30	1.20	0.70	0.21	102.22	20.5
白垩纪陆相火山碎屑—火山岩	3.17	0.64	0.13	0.33	0.08	22.48	19.4

3 结果与分析

水土流失的影响因素有地形地貌、气候特征、土壤结构等,而地质建造是人类活动过程中较为稳定的自然本底条件,不同地质建造受构造和外动力作用,形成不同的地形地貌特征,产生生态地质问题的潜力和规律也不同,影响着区内植被生境条件;另一方面不同地质建造其岩性、风化壳和土壤的元素组成具有较大的差异性,对区内的乔、灌、草等植被产生的影响不同,进而表现不同的生态地质特征。因而,地质建造与水土流失分布特征有着十分密切的关系^[19]。

本文以同属丘陵山区且出露面积较大的 3 个建造类型为例从土壤结构、植被因子、地形坡度 3 个方面探讨其与水土流失的关系。

3.1 土壤结构

土壤是形成地质建造及其生态地质特征的物质基础。不同土壤结构的物理力学性质和地质特征是形成不同生态问题和特征的重要原因。本文以不同建造的土壤结构物理性质与水土流失相关性进行说明。

黏聚力是物质内部相邻各部分之间的相互吸引

力,是土体抵抗外力侵蚀的重要指标,黏聚力越低,土体抗侵蚀能力越弱,越容易流失,而土壤粒度是土壤结构的基本指标,是导致黏聚力差异的重要因子^[20]。研究表明^[21],土壤黏聚力随着砂粒含量增加,先增大后减小,当砂粒含量超过 50% 时,黏聚力急剧下降,并随含砂量增大逐渐趋于零(图 3)。

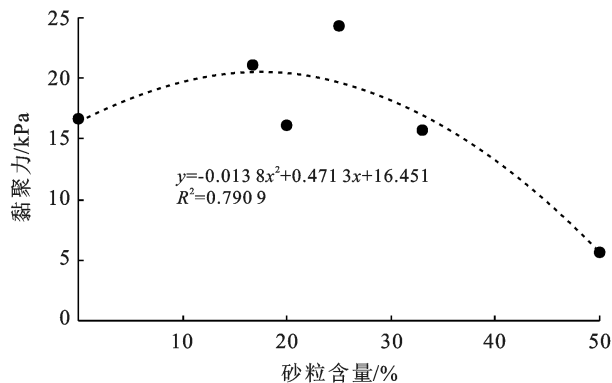


图 3 黏聚力与砂粒含量关系

为了进一步了解土壤结构对罗山县水土流失的影响,本项目分别在白垩纪酸性岩浆岩建造、泥盆纪变类复理石建造、中元古界变基性火山—沉积建造开

展了1:5万生态地质调查,每个单元选取3个生态地质典型点(具有典型代表性)进行了采样,编号为①,②,③,通过实验室测试分别测出其粒度成分(表3)。白垩纪酸性岩浆岩建造土壤的成分中砂粒含量最高,占比为54%~68%;泥盆纪变类复理石建造岩石种类杂,土壤样品的粒度变化较大,砂粒含量占比为13%~56%;中元古界变基性火山—沉积建造砂

粒含量较少,占比为13%~35%。

根据黏聚力与砂粒含量的关系可知,在其他条件相同的情况下,白垩纪酸性岩浆岩建造土壤抗侵蚀能力最弱,易流失,因此,水土流失最为严重;泥盆纪变类复理石建造、中元古界变基性火山—沉积建造土壤抗侵蚀力相对较强,水土流失情况较轻。结论与罗山县水土流失空间分布情况基本吻合。

表3 典型建造单元土壤粒度含量及比例

采样点	项目	白垩纪酸性岩浆岩			泥盆纪变类复理石			中元古界变基性火山—沉积岩		
		砂粒	粉粒	黏粒	砂粒	粉粒	黏粒	砂粒	粉粒	黏粒
①	含量/(g·kg ⁻¹)	540.3	319.3	140.4	131.0	673.8	195.2	130.8	683.5	185.7
	比例/%	54	32	14	13	67	20	13	68	19
②	含量/(g·kg ⁻¹)	559.3	288.3	152.4	557.5	263.5	179.0	247.5	535.0	217.5
	比例/%	56	29	15	56	26	8	25	54	22
③	含量/(g·kg ⁻¹)	680.7	194.3	125.0	413.5	410.0	176.5	351.7	435.3	213.0
	比例/%	68	19	13	41	41	18	35	44	21

3.2 植被因子

植被是控制土壤侵蚀重要的环境因子,是防治土壤侵蚀的积极因素,主要表现为冠层对降雨的截留、枯落层对地表径流的吸收与调节、根系的固土作用,植被覆盖度越高,结构越复杂,其水土保持功能越强^[22-23]。

为研究植被因子对罗山县水土流失的影响关系,选取了上述3个建造单位开展1:5万生态地质调查,调查路线采用穿越法分别穿越了3个建造单元,对每个生态地质典型点的植被因子进行了记录(表4)泥盆纪变类复理石建造植被覆盖率为50%~80%,以65%的植被覆盖率居多,优势树种平均树高为5~30m,多为8m左右,平均胸径为13~25cm,胸径以15cm左右的居多;中元古界变基性火山—沉积建造植被覆盖率为55%~80%,65%的植被覆盖率居多,优势树种平均树高为6~12m,多为7m左右,平均胸径为8~20cm,其中胸径20cm的调查点居多;白垩纪岩浆岩建造除个别调查点位于坡脚,土壤层较厚,植被长势较好外,植被覆盖率主要为30%~50%,优势树种平均树高为3~4m,平均胸径为5~8cm。

对上述3个建造的植被因子进行比较分析可知(图4),泥盆纪变类复理石建造和中元古界变基性火山—沉积建造植被因子虽互有高低,但大体相近,无明显的差异,而白垩纪岩浆岩建造除个别调查点外,无论是植被覆盖率还是优势树种的平均树高和胸径都较其他建造低。因此,由植被因子与水土流失的影

响关系可知,白垩纪酸性岩浆岩建造的植被因子对水土的保护作用较其他建造弱,在同等条件下白垩纪岩浆岩建造土壤被侵蚀得更严重。这表明植被因子对罗山县水土流失分布特征具有重要作用。

表4 典型建造单元植被因子统计结果

建造类型	调查点	植被覆盖率/%	优势树种平均树高/m	优势树种平均胸径/cm
泥盆纪变类复理石	D0024	80	30	20
	D0028	50	5	15
	D0029	65	8	20
	D0030	65	10	25
	D0455	65	8	14
	D0456	80	8	15
	D0460	55	6	13
中元古界变基性火山—沉积岩	D0032	80	12	8
	D0035	65	6	12
	D0432	55	7	20
	D0433	65	7	15
	D0434	60	8	20
	D0435	65	11	20
	D0438	65	9	20
白垩纪岩浆岩	D0470	30	3	6
	D0471	45	3	7
	D0478	45	2	5
	D0479	45	3	8
	D0480	45	4	5
	D0811	70	10	15
	D0812	50	3	6

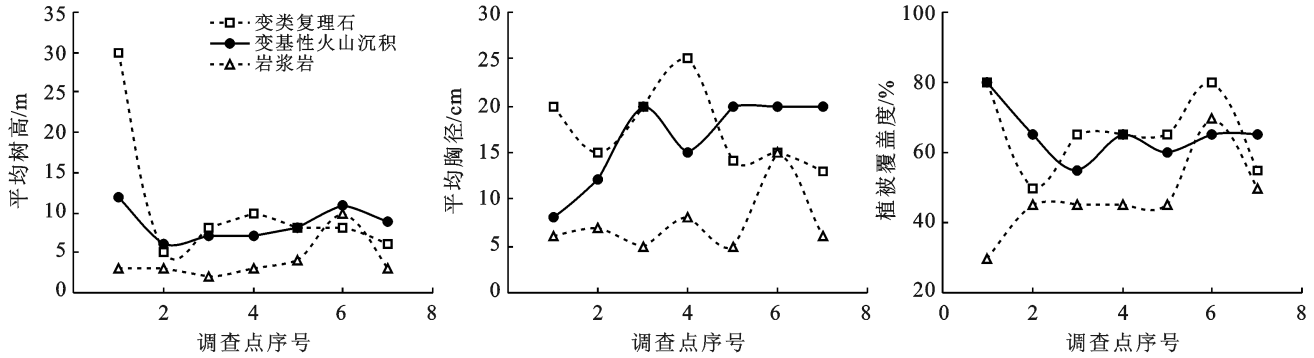


图 4 罗山县典型建造植被因子数据对比

3.3 地形坡度

坡面流是土壤侵蚀和输沙的主要动力^[24],斜坡坡度影响地表径流的冲刷能力^[25]。研究表明^[26],在相同降雨量的情况下,斜坡坡度在 $0^{\circ}\sim 17^{\circ}$ 范围内,随着坡度的增加,土壤的侵蚀量缓步增长;坡度在 $17^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 范围内,土壤侵蚀量急剧增长;坡度大于 25° ,水力影响降低,侵蚀量随坡度增长呈下降趋势,逐步发展为重力侵蚀(图 5)。

为进一步验证地形坡度与水土流失的关系,对白垩纪岩浆岩建造典型的水土流失区进行了实地调查(图 6)。由图 6 可知,在坡度在 10° 以下的缓坡、平坡土壤侵蚀形式主要为面蚀,通过垂向剖面揭露,见发育有腐殖质层,地表可见草本植物生长;坡度在 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间的斜坡,腐殖质层发育较少,局部已侵蚀至母质层,侵蚀类型为面蚀、细沟蚀为主;坡度为 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$

的陡坡,土壤层基本不发育,成土母质大量出露,局部可见基岩出露,草本植物基本不生长,土壤侵蚀发展至深沟状侵蚀。进一步表明,地形坡度对水土流失强度有重要影响。

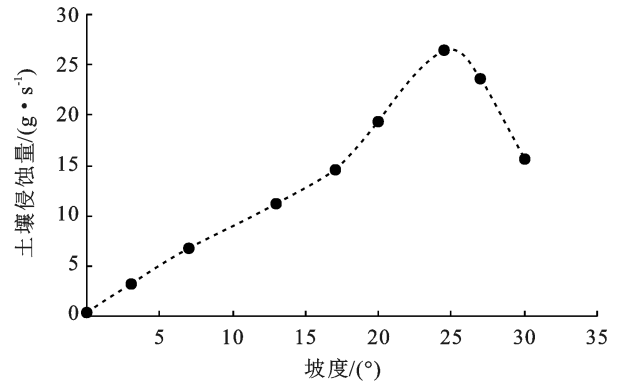


图 5 罗山县土壤侵蚀量与坡度的关系



图 6 罗山县不同坡度土壤侵蚀情况

对上述 3 个建造单元的地形坡度统计显示,白垩系酸性岩浆岩建造单元地形起伏较大,斜坡坡度在 $15^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间,处于土壤侵蚀急剧增长区,土壤侵蚀严重;泥盆纪变类复理石建造和中元古界变基性火山—沉积建造坡度大小分别集中于 $2^{\circ}\sim 12^{\circ}$, $2^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 之间,以缓坡、平坡为主,属于土壤侵蚀低值区,结论与罗山县水流失等级分布特征吻合。

4 讨论与结论

4.1 讨论

通过对土壤结构、植被因子、地形坡度 3 个因子研究分析可知,白垩纪酸性岩浆岩建造土壤砂粒含量高(超过 50%),土壤黏聚力低,抗侵蚀能力弱,地形坡度多位于 $15^{\circ}\sim 40^{\circ}$,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,对水土的保持能力相对较弱;而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,土壤黏聚力大,抗侵蚀能力强,地形较平坦,斜坡多为 $2^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 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较大,对水土的保持能力较强。因此,白垩纪岩浆岩建造水土流失较为严重,泥盆纪变类复理石建造和中元古界变基性火山—沉积建造水土流失相对较轻。综上所述,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。

本文虽取得了部分成果,但受时间限制,只探讨了土壤结构、植被因子、地形坡度 3 个因子对罗山县水土流失分布的影响,未对研究区土壤的化学性质(营养元素、PH 值)及水文地质特征作深入研究,特别是渗透性、地表径流、地下水等特征。水作为土壤侵蚀的动力,对水土流失有着重要的影响,是今后主要的研究内容。

4.2 结论

地质建造是人类活动过程中较为稳定的自然本底条件,在构造和外动力作用下,形成不同的地形地貌特征,产生生态地质问题的潜力和规律也不同;且由于岩性、风化壳和土壤的元素组成的差异,区内乔、灌、草等植被生长情况不同,进而表现不同的生态地质特征。

目前,主流的研究方向主要是从降雨量、土壤可蚀性、地形坡度等因子对水土流失的直接影响,从地质建造角度研究不同地质背景下水土流失的分布及相互影响关系的较少。本文基于生态地质特征调查和研究,充分考虑岩性、土壤结构、地形地貌等因素,将罗山县划分为 3 个一级建造单元,7 个二级建造单元,13 个建造类型;并将地质建造与水土流失进行叠加分析,由分析结果可知,受地质建造控制,罗山县水土流失分布具有明显的空间差异性,白垩纪酸性岩浆岩建造水土流失面积为 203.23 km^2 ,流失率高达 50.1% ,其中中度等级以上水土流失面积为 102.38 km^2 ,占总面积的 25.2% ,是水土流失最为严重的建造单元;泥盆纪变类复理石建造水土流失情况最轻,流失面积为 18.36 km^2 ,流失率为 13.5% ,中度等级以上水土流失面积为 4.3 km^2 ,占该建造面积的 3.2% ;中元古代变基性火山—沉积建造水土流失面 20.92 km^2 ,流失率为 20.5% ,中度等级以上水土流失面积为 6.41 km^2 ,占总面积的 6.3% ;经过对 3 个地质建造的生态地质条件研究及分析可知,土壤结构、植被因子、地形坡度等生态条件的差异与罗山县水土流失的分布有重要

关联。该结论可为今后有针对性地开展水土保持工作提供参考依据。

致谢:感谢项目组成员在图件制作、数据整理方面提供的帮助。特别感谢董好刚教授级高级工程师、刘红缨研究员在文章编写过程中的悉心指导。

[参 考 文 献]

- [1] 李智广,曹炜,刘秉正,等.我国水土流失状况与发展趋势研究[J].中国水土保持科学,2008,6(1):57-62.
- [2] 陈国光,刘红樱,陈进全,等.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,2020,47(6):26-35.
- [3] 水利部水土保持监测中心.我国水土保持监测工作发展成就与作用[J].中国水土保持,2021(7):1-4.
- [4] 常斐杨,行仙峰,王帆.2019 年包头市水土流失动态监测研究[J].中国水土保持,2021(7):56-58.
- [5] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
- [6] 王京彬,卫晓锋,张会琼,等.基于地质建造的生态地质调查方法:以河北省承德市国家生态文明示范区综合地质调查为例[J].中国地质,2020,47(6):1611-1624.
- [7] 中国地质调查局 DD2019-02.固体矿产地质调查技术要求(1:50 000)[S].北京:2019.
- [8] 卫晓锋,孙厚云,何新泽,等.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[C]//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,2019:2.
- [9] 刘洪,黄瀚霄,欧阳渊,等.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,2020,40(1):91-105.
- [10] 中国地质调查局 DD2019-01.区域地质调查技术要求(1:50 000)[S].北京:2019.
- [11] 郭建军,李惠卓.不同母岩母质土壤特性的分析与研究[J].河北林业科技,2003(2):7-8.
- [12] Hd J, Odum E P. Fundamentals of Ecology [J]. Population (French Edition), 1974,29(2):376-376.
- [13] 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等.RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J].水土保持研究,2004,11(4):80-83.
- [14] 傅水龙,梁娟珠,黄路平.基于 RUSLE 模型的长汀县水土流失评估[J].水土保持通报,2016,36(1):196-200.
- [15] Wischmeier W H, Smith D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [16] 吕喜玺,沈荣明.土壤可蚀性因子 K 值的初步研究[J].水土保持学报,1992,6(1):63-70.

- [5] Yang Xiaohua, Sun Boyang, Zhang Jian, et al. Hierarchy evaluation of water resources vulnerability under climate change in Beijing, China [J]. *Natural Hazards*, 2016, 84(1): 63-76.
- [6] Li Ruihuan, Guo Ping, Li Jianbing. Regional water use structure optimization under multiple uncertainties based on water resources vulnerability analysis [J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(5): 1827-1847.
- [7] 汪莹, 罗朝晖, 吴亚, 等. 岩溶地下水脆弱性评价的城镇化因子: 以水城盆地为例[J]. *地球科学*, 2019, 44(9): 2909-2919.
- [8] 周彦红, 尹华, 刘玉申, 等. 长春市水资源开发利用存在的问题及其节水潜力分析[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2015, 47(2): 153-157.
- [9] 杨天通. 长春市水资源可持续利用及其与经济脱钩分析[D]. 吉林 长春: 吉林大学, 2019.
- [10] 崔馨月, 方雷, 王祥荣, 等. 基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 302-319.
- [11] Xiang Xiaojun, Li Qiong. Water resources vulnerability assessment and adaptive management based on projection pursuit model [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 103(S1): 431.
- [12] 赵翔, 贺桂珍. 基于 CiteSpace 的驱动力—压力—状态—影响—响应分析框架研究进展[J]. *生态学报*, 2021, 41(16): 6692-6705.
- [13] Labianca C, de Gisi S, Todaro F, et al. DPSIR model applied to the remediation of contaminated sites. A case study: Mar piccolo of Taranto [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(15): 5080.
- [14] 王方方, 王延华, 蔡祖聪, 等. 基于 DPSIR 模型的曲周县氮素资源可持续利用评价与预测[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(9): 1133-1140.
- [15] 王文莹, 李明孝. 基于 DPSIR 的湖南省土地生态安全时空变化[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(8): 2724-2736.
- [16] 黄垒, 张礼中, 朱吉祥, 等. 基于综合指数法的保定市地表水资源脆弱性评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 68-73.
- [17] 艾亚迪, 魏传江, 马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(2): 11-16.
- [18] 杨法暄, 郑乐, 钱会, 等. 基于 DPSIR 模型的城市水资源脆弱性评价: 以西安市为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(1): 77-84.
- [19] 郝洋, 梁秀娟, 孟凡傲, 等. 基于 AHP-熵权法的地下水水质模糊综合评价: 以白城市为例[J]. *节水灌溉*, 2016(6): 51-54.
- [20] 顾家明, 胡卫卫, 田素妍. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的江苏省生态承载力评价及障碍因素诊断[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 246-252.
- [21] 何刚, 夏业领, 朱艳娜, 等. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的安徽省土地承载力评价及预测[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(2): 127-134.
- [22] 刘宝涛, 王冬艳, 刘惠清. 基于 DPSIR 模型与 TOPSIS 算法的吉林省土地利用系统健康诊断[J]. *吉林农业大学学报*, 2017, 39(1): 74-81.
- [23] 周奉, 苏维词, 郑群威. 基于 DPSIR 模型的黔中地区水资源脆弱性评价研究[J]. *节水灌溉*, 2018(8): 59-65.

(上接第 157 页)

- [17] 方纲, 阮伏水, 吴雄海, 等. 福建省主要土壤可蚀性特征初探[J]. *福建水土保持*, 1997, 9(2): 19-23.
- [18] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007 [S]. 北京: 2008.
- [19] 高华端. 贵州岩溶地区地质条件对水土流失的影响[J]. *山地农业生物学报*, 2003, 22(1): 20-22.
- [20] 徐加盼. 颗粒组成对花岗岩风化岩土体抗剪强度的影响研究[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2020: 24-26.
- [21] 李黎, 颜琳, 黄晶. 砾石量对砾质黏土抗剪强度参数影响规律的试验研究[J]. *四川建筑*, 2013, 33(2): 74-75.
- [22] 刘洋, 李春阳. 植被因子对水土流失的影响[J]. *世界科技研究与发展*, 2005, 27(5): 95-99.
- [23] 刘悦, 刚成诚, 温仲明, 等. 降雨和植被因子对延河流域土壤侵蚀影响的定量评估[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2): 35-42.
- [24] 潘成忠, 上官周平. 降雨和坡度对坡面流体力学参数的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(6): 843-851.
- [25] 邓辉, 何政伟, 陈晔, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 模型的山地环境水土流失空间特征定量分析: 以四川泸定县为例[J]. *地球与环境*, 2013, 41(6): 669-679.
- [26] 陈法扬. 不同坡度对土壤冲刷量影响试验[J]. *中国水土保持*, 1985(2): 20-21.