

贵州喀斯特地区河网分布规律及其主控要素分析

陈伟燕^{1,2}, 王世杰^{1,3,*}, 白晓永^{1,3}, 秦罗义⁴, 张斯屿^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100; 4. 贵州师范大学, 贵阳 550000)

摘要:为揭示喀斯特地区河网的空间分布规律及其与主控自然要素的关系,运用GIS为主要分析手段,以贵州为研究样区,通过数字矢量化1:5万水系图、降雨量分布图、地貌类型图、坡度图、岩性图等,进行空间叠加分析,定量计算了不同类型区河网密度值,分析了贵州河网的空间分布特点。结果表明:贵州平均河网密度为781.84 m/km²,受构造运动影响较为明显,整体呈现出“东密西疏”的特点。非碳酸盐岩地区河网密度为1000.43 m/km²,石灰岩地区为597.16 m/km²,白云岩地区为779.41 m/km²,河网密度与岩性具有明显的相关性,非碳酸盐岩地区河网密度要远远高于碳酸盐岩地区,白云岩地区河网密度高于石灰岩地区;在垂直空间上,坡度 $\leq 2^\circ$ 时,河网密度最大,为1237.36 m/km²,而坡度 $\geq 25^\circ$ 时,河网密度为379.37 m/km²,随着坡度的增加河网密度明显降低。

关键词:河网密度;降雨量;构造;地貌;坡度;岩性

中图分类号:P642.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9250(2013)03-0193-10

河流是地表流水地貌的重要组成部分^[1],由一定区域内地表水和地下水补给,经常或间歇地沿着狭长凹地流动的水流,是地球上水循环的重要路径,对全球的物质、能量的传递与输送起着重要作用,作为水文循环的重要一环,不仅为人类生存提供了有利条件,也是各种水生生物生存的自然空间,在为人类提供宝贵水资源的同时,河流也为环境的调节和改善发挥着重要作用^[2]。由河流相互贯通组成的网络状泄水系统就构成了河网,河网的空间分布格局会直接影响社会经济的发展及生物多样性、脆弱生态环境的恢复等自然过程^[3]。

对于河网的研究一直吸引着众多学者的关注,主要集中在水系的分形研究^[4-7]、河网的演化规律^[8-10]、河流水系与地貌形态的耦合^[11-16]、河网的自动提取技术^[17-19]等,定性描述居多,定量分析较少,而且大多数研究集中在非喀斯特地区,针对喀斯特地区的河网研究相对较少。随着信息技术的发展应用,地学研究已经从定性研究向半定量定量研究方向发展,河网密度是量化研究河网空间分异

规律的一个重要指标^[20],早在1932年霍尔顿(Horton)就指出河网密度随着降雨量的提高而增大,经过前人大量的研究,普遍得出:河网密度受气候、岩性、地貌等因素影响^[21-26]。然而喀斯特地区由于其特殊的双重含水介质所组成的地表地下二元三维的独特水文地貌结构及其功能效应,使得其水系发育表现出与非喀斯特地区的巨大差异^[27],因此,本研究在前人工作基础上,结合喀斯特地区独特水文地质背景,定量分析在不同自然要素的控制下,河网密度的空间分异规律,进而探讨影响贵州河网分布的主要因素,以期更好为服务于喀斯特地区石漠化演化趋势的分析、洪水危险性评估、水资源的利用、脆弱生态环境修复等奠定理论基础。

1 研究区概况

贵州地处亚热带湿润气候区,降水丰富,年降水量平均为1100~1300 mm,贵州河流处在长江和珠江两大水系上游交错地带,以中部的苗岭山脉为分水岭,北部属长江流域,南部属珠江流域,长度在10

收稿日期:2013-01-12;改回日期:2013-03-28

基金项目:国家973项目(2013CB956702);中国科学院战略性先导科技专项重大课题(XDA05070400);国家自然科学基金创新群体项目(40721002),国家自然科学基金项目(41001162);贵州省科技计划(黔科合重大专项字(2012)6015号)。

第一作者简介:陈伟燕(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为环境遥感。E-mail: chenweiyao0622@163.com.

*通讯作者:王世杰,男,博士,研究员。E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn.

km 以上的河流有 984 条,水力资源丰富。温湿的气候为喀斯特的发育提供了有利的条件,贵州是世界三大喀斯特集中分布区之一的东亚片区中心,是中国乃至世界热带、亚热带喀斯特分布面积最大、发育最强烈的高原山区,喀斯特分布面积为 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省国土面积的 73.8%, 全省喀斯特出露面积 $11 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省国土面积的 61.92%^[28], 高居全国之首。

2 数据来源与处理

以贵州省 1:5 万地形图为数字化底图,利用扫描仪将底图扫描成二值栅格,以 TIF 格式储存,得到贵州省栅格地形图数据,在 ArcGis[®] 操作平台上,用标准图框对其进行精确校正,然后启动 ArcCatalog 程序新建线文件,在操作窗口中加载栅格数据和线文件,进行栅格数据的矢量化。贵州省河流网络系统分布图是运用上述方法,通过数字化 1:5 万贵州省地形图得到。降雨量空间分布图是根据贵州省国土资源厅编制的《贵州省地图集》降水分布图数字化而成;构造单元划分图根据《贵州区域地质志》构造分区图数字化得到,地貌图是根据国务院《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲》对地貌划分的要求绘制而成。岩性分布图来源于课题组前期研究成果^[28];坡度图通过 1:5 万的地形图提取得到等高线分布图,运用 ArcGis[®] 软件 3D 分析模块生成 DEM (数字高程模型),进而提取坡度分布图。

在 ArcGis[®] 操作窗口中分别加载上述各矢量图,通过属性选择选出各图层类型区,另存为面图层,运用 ArcGis[®] 中“Clip”命令,用该面图层裁剪贵州省河流网络系统分布图,然后统计该区域面积及对应河网长度,从而计算该区域河网密度值。

3 结果与分析

3.1 河流网络系统的总体分布特点

利用 ArcGis[®] 的空间分析功能,通过对贵州河网分布图的空间运算得出:贵州全省河网总长度达 $13.77 \times 10^4 \text{ km}$, 平均每平方千米河网长 0.78 km, 明显大于李家平等(2002)^[29] 对贵州省情中介绍的 0.56 km/km^2 及林俊清(2000)^[24] 计算得出的 0.57 km/km^2 , 接近于水利部规划计划司 2001 年公布的贵州省河网密度 0.71 km/km^2 , 主要原因可能是研究尺度的不同,本研究采用 1:5 万地形图为底图对河网进行矢量化,得到的河网可能更细化、更详尽,

更接近真实情况,因此,河网密度相对较大。

另一方面,贵州河网密度的空间分布呈现出“东密西疏”的分布格局(图 1)。若以贵阳为中心将贵州分为四个象限,河网密度分别为 778.95 m/km^2 、 693.05 m/km^2 、 724.57 m/km^2 、 971.69 m/km^2 , 东南部河网密度最大。这种分布格局的形成可能与贵州处在新构造运动上升地区,受青藏高原隆升影响,地势由西向东掀斜抬升^[30-32], 导致河网空间分异度较大有关,也可能与其他的影响河网分布的主控自然要素有关。

3.2 影响河网分布的主要因素

通过前人大量的研究^[21-26], 河网密度主要受气候、地貌、岩性、地表起伏度等因素的影响,由于本文以贵州为研究区,温度、光照等气候因子差别不大,而降雨作为河流水源的补给,差异又较其他气候因子显著,因此,气候因子中只考虑降水对河网的影响。地貌的形态特征、地面组成物质的差异对区域内水、土、热、光等因素具有一定的制约性,对喀斯特河网的分布具有一定程度的影响;喀斯特水循环同岩性密切相关^[21], 河流作为水文循环的重要一环其分布特点也受到岩性影响;坡度反映了地表起伏的状况,影响河流的走向;构造作用在宏观上通过控制地形地貌直接影响河网的分布;因此,通过以上分析,本文最终选定降雨量、构造分区、地貌类型、坡度、岩性五个自然要素,对贵州喀斯特地区河网密度的自然影响因素进行分析。

3.2.1 降雨量与河网密度关系

河网密度与降雨量呈正相关关系,即降雨量越大的地区,河网密度一般越大^[14]。但是本文通过将贵州降水等值线图与贵州河网叠加运算发现,结果却不完全是这样:贵州降雨量最大的区域降水量大于 1400 mm, 主要分布在西南部的六枝-普安-兴义一带及南部的都匀等地,然而平均河网密度只有 669.94 m/km^2 ; 但是降水量在 1200~1300 mm 之间的锦屏-从江-榕江一带及罗甸、万山、平坝等地区,河网密度却有 894.07 m/km^2 , 后者远高于前者(表 1)。贵州河网密度与降雨量分布的不完全一致,表明它的分布可能还受到其他因素,如下垫面的影响,通过叠加岩性图发现(图 2),在降水量大于 1400 mm 地区,主要处在碳酸盐岩控制区,喀斯特发育,可溶性大,透水性强,易形成二元三维立体结构,使降水通过裂隙迅速汇入地下,减少了地表河网密度;在降水量为 1200~1300 mm 之间的地区,虽

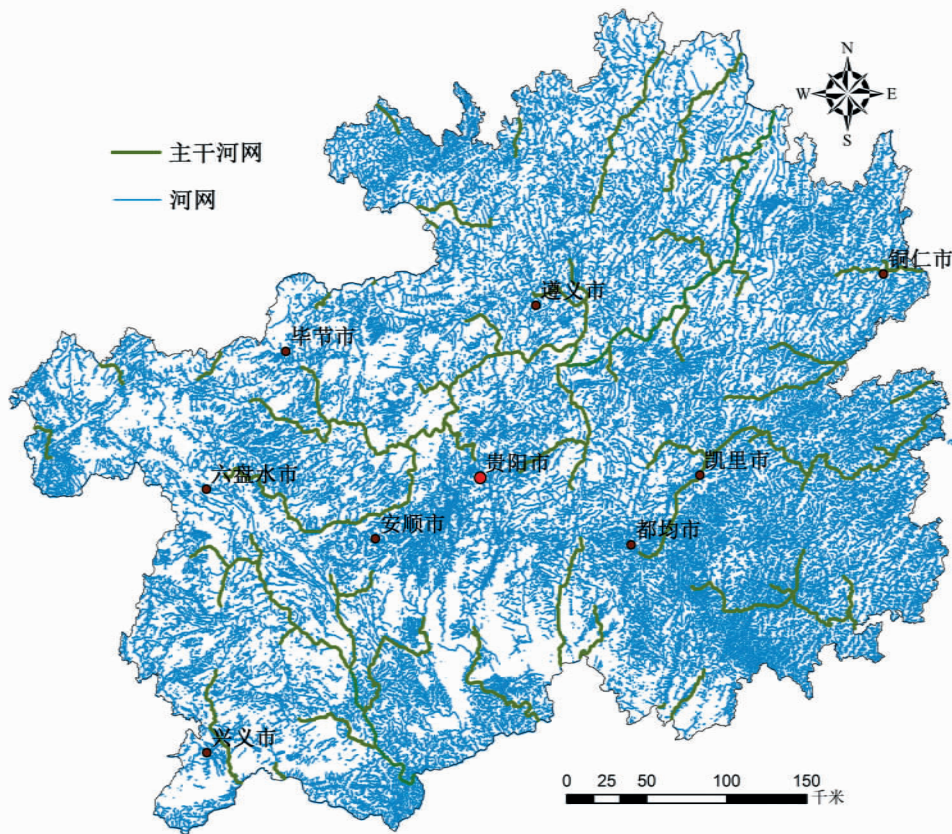


图 1 贵州河网空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution map of drainage network in Guizhou province

然在罗甸、平坝等有碳酸盐岩出露,但比例并不大,而且喀斯特发育不典型,反而在锦屏-从江-榕江一带聚集了大面积的非碳酸盐岩,非碳酸盐岩的不透水性可能提升了该区河网密度的平均值。河网密度与岩性空间分布之间的关系在下文有专门讨论,在此不做累述。

表 1 降雨量与河网密度关系

Table 1 The relationship between drainage density with amount of rainfall

降雨量 (mm)	河网长度 (km)	区域面积 (km ²)	河网密度 (m/km ²)
≥1400	8291.71	12376.84	669.94
1300~1400	26674.64	32098.61	831.02
1200~1300	43192.41	48310.07	894.07
1100~1200	38717.45	51179.23	756.51
1000~1100	18130.12	26175.03	692.65
≤1000	3031.30	5935.62	510.70

3.2.2 构造与河网密度的关系

地质构造造成沿地质构造带的岩石破碎,岩石

破碎后易于风化,进而更加破碎而形成碎屑或土体,碎屑和土体易受水流侵蚀和搬运,从而形成小的冲沟,成为水流的固定流路,水流的不断侵蚀形成沟谷,构成了水系或水系的支流^[33]。通过对不同构造单元分区的进一步研究(图 3),华南褶皱带河网密度最大,为 1090.17 m/km²,四川台坳次之,为 993.66 m/km²,威宁北西向构造变形区最小,为 574.31 m/km²(表 2)。威宁北西向构造变形区主要包括“深层构造”和“表层构造”两部分^[34],以集中分布的西北向褶皱和压性断层占主导地位^[32],形成北西向河谷破碎带,河流沿谷底发育,不易向谷坡展布,河网相对稀疏。华南褶皱带经过早古生代末期的造山运动,形成基底褶皱,使陆壳增厚^[35],主要由下古生代地层组成,以碎屑岩为主,河网分布相对较为密集。四川台坳内部地层褶皱微弱,断裂构造不发育^[35],同时区内以沉积岩为主,为河流的展布提供了有利的条件。构造运动使贵州河网的展布呈现规律性,不同构造单元区河网密度分异较大,构造是影响贵州河网分布的一个主控因素。

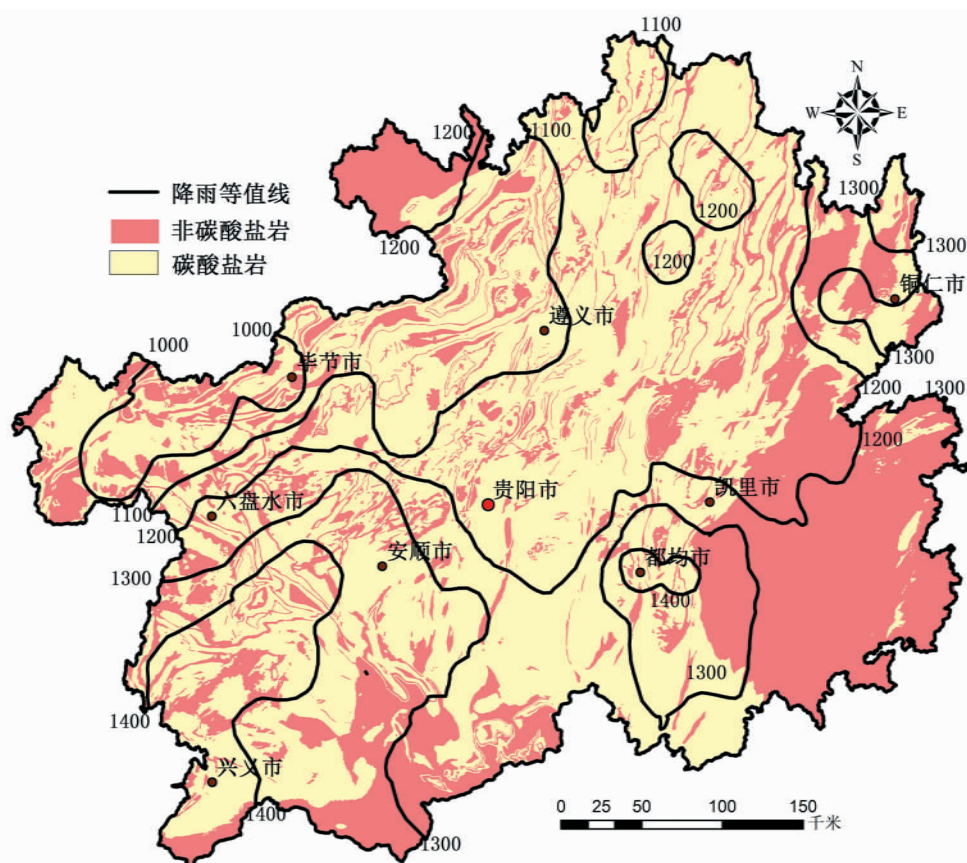


图2 贵州降雨量、岩性叠加分布图

Fig. 2 Spatial distribution overlay map of rainfall and lithology in Guizhou province

表2 构造单元与河网密度的关系
Table 2 The relationship between drainage density with tectonic units

构造分区	河网长度 (km)	区域面积 (km ²)	河网密度 (m/km ²)
毕节北东向构造变形区	14782.16	22343.48	661.59
凤岗北北东向构造变形区	20871.99	30692.83	680.03
贵阳复杂构造变形区	25582.90	29763.38	859.54
威宁北西向构造变形区	5461.99	9510.53	574.31
普安旋扭构造变形区	11759.44	19331.00	608.32
贵定南北向构造变形区	19568.26	24759.45	790.33
望谟北西向构造变形区	8595.60	10022.90	859.60
四川台坳	3536.53	3559.08	993.66
华南褶皱带	28454.42	26101.02	1090.17

3.2.3 坡度与河网密度的关系

在非构造控制和均质岩石上发育的水系一般呈树枝状,水系形成取决于地表形态和地面坡度。为了解坡度与河网密度的关系,根据《第二次全国土地

调查技术规程》中规定的坡度分级要求将坡度范围分为 $\leq 2^\circ$ 、 $2^\circ \sim 6^\circ$ 、 $6^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 、 $> 25^\circ$ 五个坡度级(上含下不含)^[36],统计其坡度范围内河网密度发现:坡度 $\leq 2^\circ$ 时,河网密度最大,为1237.36 m/km²;坡度在 $2^\circ \sim 6^\circ$,河网密度为953.26 m/km²;坡度在 $6^\circ \sim 15^\circ$,河网密度为601.80 m/km²;坡度在 $15^\circ \sim 25^\circ$,河网密度为488.01 m/km²;坡度 $> 25^\circ$ 时,河网密度最小,河网密度为379.37 m/km²(表3)。在坡度相对平缓时($\leq 10^\circ$),河网密度随坡度增加而快速减少,坡度较大时($> 30^\circ$),河网密度较小,变化相对较慢(图4)。因此,坡度是在垂直方向上决定贵州河网分布的一个重要因素。

3.2.4 地貌类型与河网密度的关系

地貌是自然综合体的重要因素,以其形态特征、地面组成物质的差异,对水、土、热、光等因素的制约而影响生态环境与社会经济的发展。国务院2008年批复的《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲》(中国国际工程咨询公司2007年编制)提出了我国南方

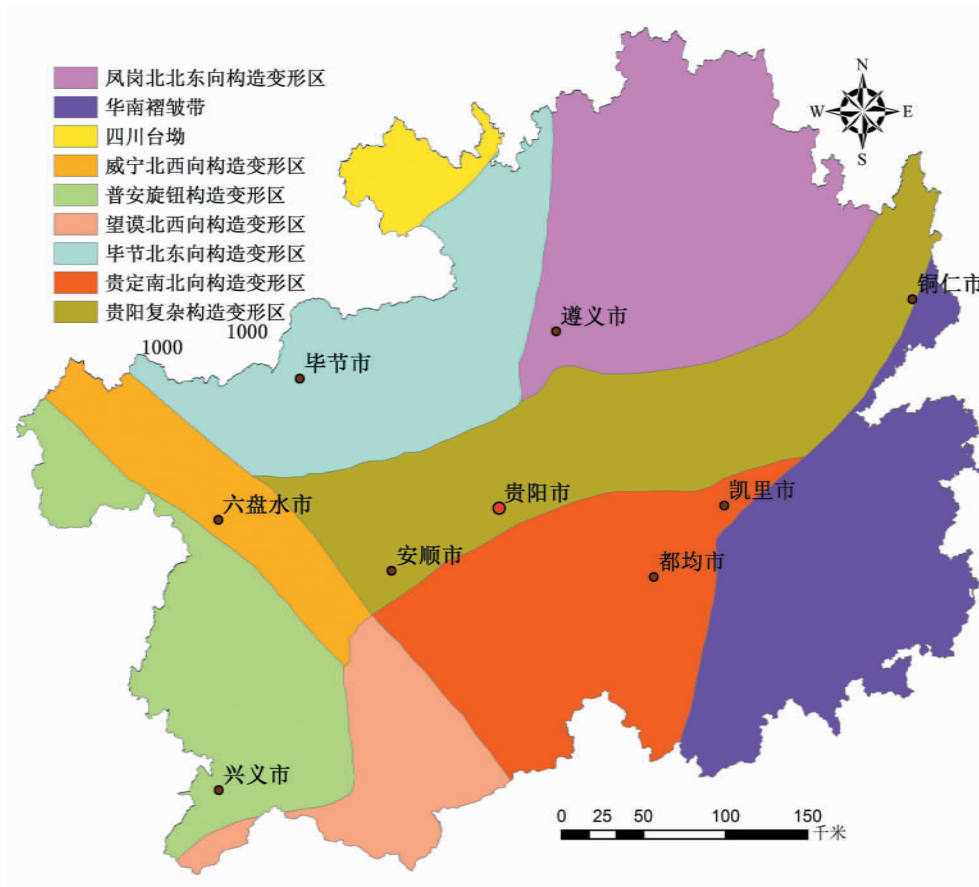


图 3 贵州构造单元划分图

Fig. 3 Map showing tectonic units in Guizhou province

表 3 坡度与河网密度关系

Table 3 The relationship between drainage density with slope

坡度	河网长度 (km)	区域面积 (km ²)	河网密度 (m/km ²)
≤2°	64225.26	51904.93	1237.36
2°~6°	16942.66	17773.43	953.26
6°~15°	31683.74	52647.95	601.80
15°~25°	19792.92	40558.79	488.01
>25°	5014.05	13216.72	379.37

石漠化治理工程分区(以下简称《石漠化分区》)。《石漠化分区》综合考虑了喀斯特地质地貌、水文结构特征、生态环境条件、石漠化成因与治理措施等方面的相似性,借鉴了我国现有的地理气候区划、社会经济及行政区划等成果资料,将南方喀斯特地区分为高原、峡谷、峰丛洼地、槽谷、断陷盆地、中高山、峰林平原和溶丘洼地等八个石漠化综合治理地貌区,贵州喀斯特地貌以岩溶槽谷、岩溶高原、岩溶峡谷、峰丛洼地、断陷盆地分布为主(图 5)。运用 ArcGis® 软

件,通过贵州省地貌类型图与河流网络系统空间分布图的叠加、统计求得:东部的非喀斯特地貌区河网密度为 1102.41 m/km²,而西部喀斯特地貌区河网密度仅为 738.32 m/km²,这主要是由于喀斯特地区独特的下垫面结构,影响了喀斯特地区持水保水和储水的功能,表现出流域赋水能力低^[37],地表河网稀疏的特点。在喀斯特地区,峰丛洼地的河网密度最大,岩溶槽谷次之,岩溶峡谷最小,但结果相差不大(表 4)。虽然河网密度受大的地貌类型区影响,但喀斯特地貌类型对其影响不是很明显。

3.2.5 岩性与河网密度的关系

喀斯特水系统的水循环主要受地层岩性影响^[21],河网的发育也同岩性密切相关^[28, 37-38]。喀斯特地貌的一个最大特征就是存在大量的碳酸盐岩^[39,40],因此,我们将贵州岩性划分为碳酸盐岩和非碳酸盐岩两大类,分别求得河网密度为 648.52 m/km²和 1000.43 m/km²,相差悬殊,主要是由于碳酸盐岩的可溶性大、透水性强、地下溶蚀空间发育,形成地表地下双层结构,使大气降水通过竖井、

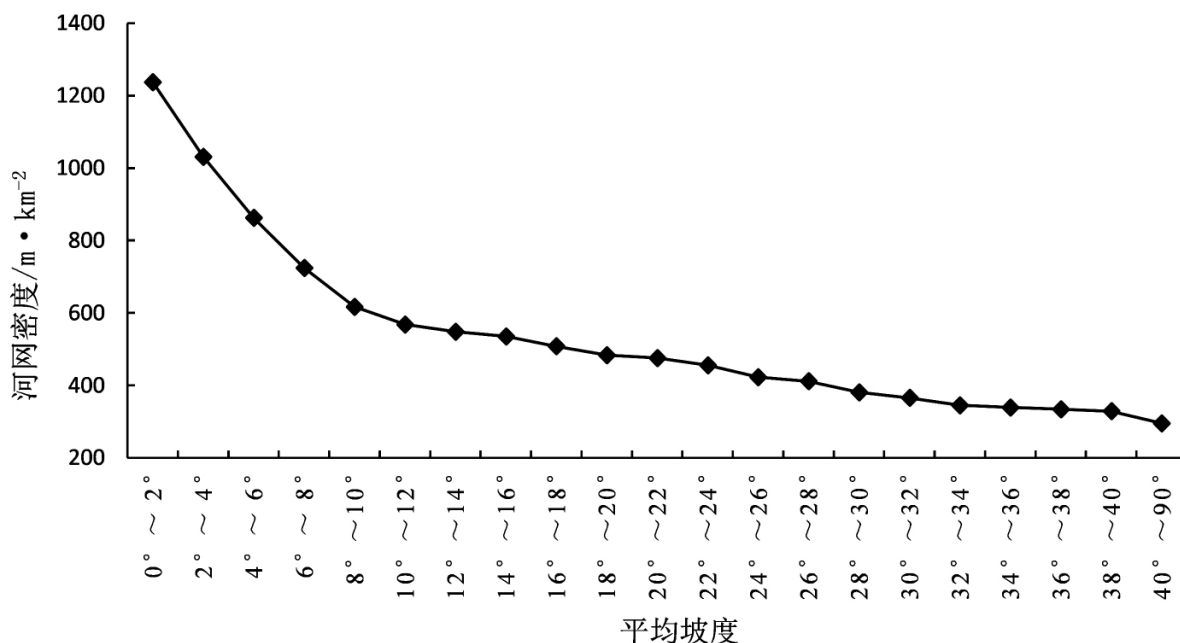


图4 河网密度与坡度关系图

Fig. 4 Map showing the relationship between drainage density and slope

表4 地貌类型与河网密度的关系

Table 4 The relationship between drainage density with landform type

地貌类型	河网长度 (km)	区域面积 (km ²)	河网密度 (m/km ²)
非喀斯特地区	66710.28	66681.61	1102.41
喀斯特地区	70967.66	109412.32	648.52
岩溶槽谷	36472.25	47581.40	766.52
岩溶高原	42233.80	55603.01	759.56
岩溶峡谷	12938.31	21478.13	602.39
峰丛洼地	18359.63	23814.89	770.93
断陷盆地	3667.61	5481.70	669.06

表5 岩性与河网密度的关系

Table 5 The relationship between drainage density with lithology

岩石类型	河网长度 (km)	区域面积 (km ²)	河网密度 (m/km ²)
连续性石灰岩组合	13502.16	30676.34	440.15
石灰岩夹碎屑岩组合	14631.95	19339.41	756.59
石灰岩与碎屑岩互层	16799.96	25230.51	665.86
连续性白云岩组合	17627.62	22990.48	766.74
白云岩夹碎屑岩组合	5886.58	7209.95	816.45
白云岩与碎屑岩互层	238.27	275.85	863.77
石灰岩、白云岩混合组合	2281.12	3689.78	618.23
硅质岩、变质岩等	6671.02	66681.61	1000.43

落水洞、漏斗等快速汇入地下,导致地表径流锐减,河网分布相对非碳酸盐岩地区稀疏。

喀斯特地区分布最广泛的两类碳酸盐岩是石灰岩和白云岩,根据贵州岩性的特点及前人的研究工作^[23,41-42],同时考虑到碳酸盐岩纯度对河网发育的影响,将碳酸盐岩分为以下七类(图6)。从各岩性区河网密度来看(表5),连续性石灰岩区河网密度远远低于其它所有岩性区,河网密度为 440.15 m/km²;白云岩与碎屑岩互层组合区河网密度最大,为 816.45 m/km²,两者相差悬殊,主要是由于碳酸盐岩不同类

型、不同岩层组合使水循环途径及调蓄功能具有自身的特点^[43],导致河网密度差异明显。

整体上,白云岩组合区河网密度要大于石灰岩组合区,且随夹碎屑岩含量的增加,河网密度也逐渐增加,二者成正相关关系,但石灰岩组合区中并没有这样的规律,石灰岩与碎屑岩互层区的河网密度反而比石灰岩夹碎屑岩区还要小。虽然白云岩和石灰岩都是碳酸盐岩,具有碳酸盐岩的共同特征,但也存在一定差异。白云岩的空隙相对发育,渗透性较好,加之以物理崩解为主要的风化形式^[44],在构造力的

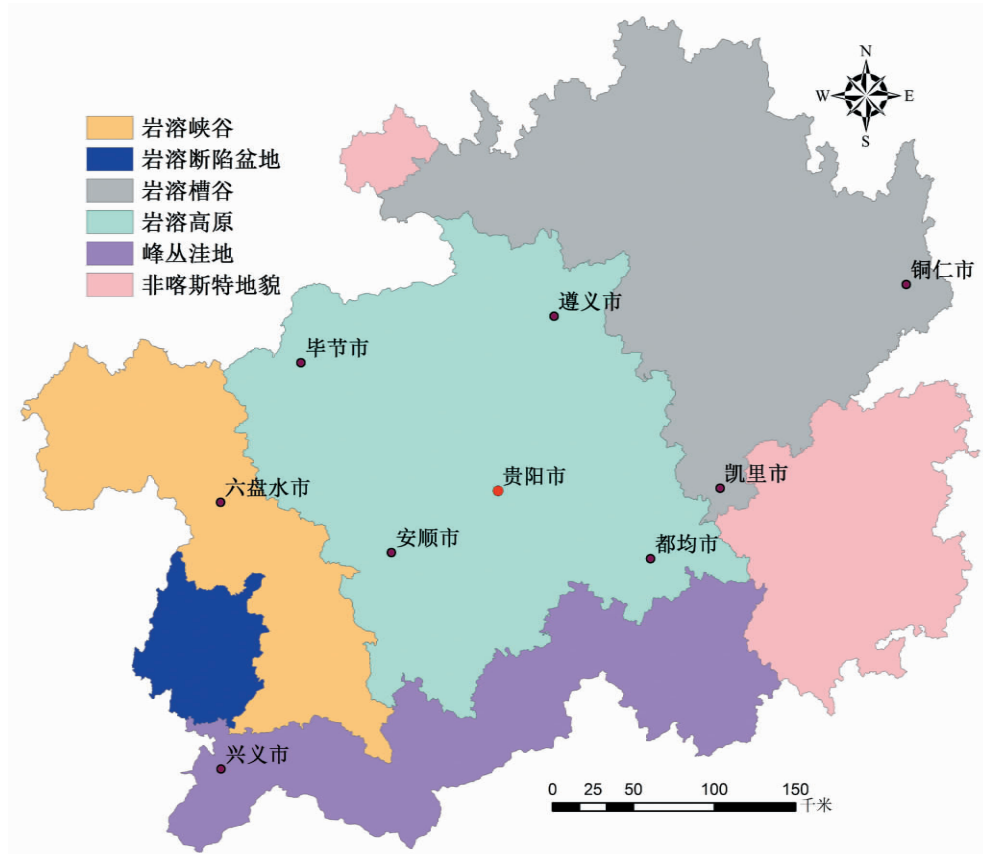


图5 贵州省地貌类型分布图

Fig. 5 Map showing geomorphic type in Guizhou province

作用下,产生较均匀、密集的节理;而石灰岩中矿物颗粒致密、孔隙度较小,在受力时产生的节理裂隙分布极不均匀,基岩裂隙的发育程度和规模也与白云岩不同,易形成岩石裂隙、落水洞、管道、洞穴系统等,使大气降水易从裂隙快速汇入地下,不利于产流。在风化过程中,白云岩会释放大量的镁离子,而石灰岩则不能,这些镁离子对于一些次生粘土矿物的产生至关重要^[45]。再者,二者的溶蚀残余物在地表的堆积和丢失方式也不同,石灰岩区土粒易聚集在掩体的裂隙中,白云岩区溶蚀残余物则相对分布于地表^[22],其形成的土壤层通常厚于石灰岩地区^[45,46],致使土壤类型也不同,从而影响了地表植被类型,进而对河流的下渗和产流方式产生影响,导致白云岩地区河网密度要大于石灰岩地区。至于石灰岩与碎屑岩互层区的河网密度小于石灰岩夹碎屑岩区河网密度的原因,除了上述提到的其本身的岩性特征外,也可能是因为地层叠置的关系,大面积纯厚的石灰岩置于碎屑岩上,致使河网密度较夹层的要低。

4 结论

1) 贵州河网总长度达 137678 km,平均每平方千米河网长 0.78 km,宏观上贵州河网密度受控于地质构造影响,分布格局呈现“东密西疏”的特点。由于贵州降水量差异不是很显著,河网密度与降雨量分布的不完全一致,同时喀斯特地貌类型对河网密度影响也不大。

2) 在垂直空间上,坡度对河网密度影响较大。坡度 $\leq 2^\circ$ 时,河网密度最大,且随着坡度增大河网密度不断减小;在坡度相对平缓时($\leq 10^\circ$),河网密度随坡度增加迅速减少,坡度较大时($\geq 30^\circ$),河网密度较小,变化也相对缓慢。坡度是影响贵州河网在垂直方向上分布的一个重要因素。

3) 贵州河网密度与岩性空间分布的耦合关系较好,呈现出非碳酸盐岩区河网密度要远远高于碳酸盐岩组合区。在碳酸盐岩中,连续性石灰岩区河网密度远远低于其它所有岩性区,白云岩与碎屑岩互层组合区河网密度最大;整体上白云岩组合区河网密度要大于石灰岩组合区,且随夹碎屑岩含量的增加,

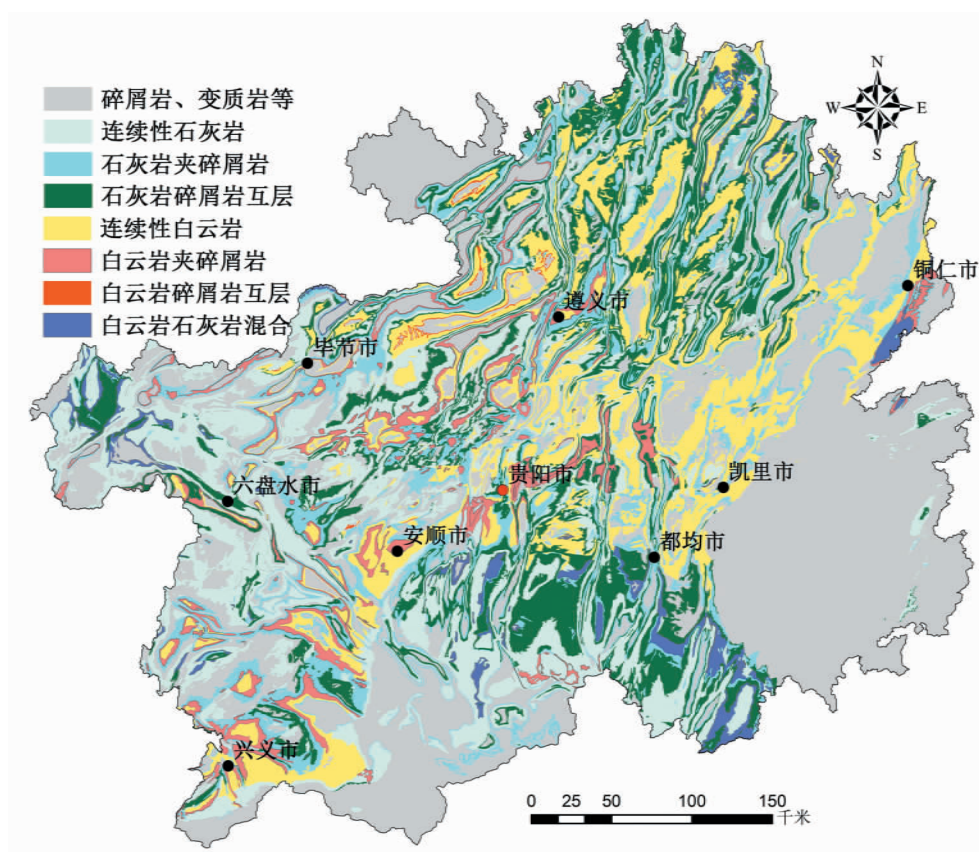


图6 贵州省岩性空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution map of lithology in Guizhou province

河网密度也逐渐增加,但石灰岩组合区中并没有这样的规律,石灰岩与碎屑岩互层区河网密度反而比石灰岩夹碎屑岩区还要小。

综上所述,宏观上贵州河网密度受控于地质构造影响,呈现出东密西疏的特点,不同构造区河网密

度差异较大。同时,岩性和坡度在区域上对河网分布的影响比较明显。因此,构造单元、岩性、坡度是影响贵州河流网络系统空间分布的主控因素,降雨量和喀斯特地貌类型对河流网络系统的空间分布影响不大。

参 考 文 献

- [1] 刘怀湘,王兆印. 典型河网形态特征与分布[J]. 水利学报, 2007, 38(11):1354—1357.
- [2] 廖文根. 河流生态水文学研究现状[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(2):301—306.
- [3] 陈求稳,欧阳志云. 流域生态学及模型系统[J]. 生态学报, 2005, 25(5):1184—1190.
- [4] Schuller D, Jeong R. Fractal characteristics of dense stream networks[J]. Journal of Hydrology, 2001, 243: 1—16.
- [5] 王秀春,吴珊,毕晓丽,等. 泾河流域水系分维特征及其生态意义[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2004, 6(3): 364—368.
- [6] Mahmood S, Richard G. Fractal Measures of Drainage Network to Investigate Surface Deformation from Remote Sensing Data: A Paradigm from Hindukush (NE-Afghanistan) [J]. J. Mt. Sci, 2011, 8: 641—654.
- [7] 刘涓,郑畅,张卫华,等. 四川盆地丘陵山区局地水水分形分维研究[J]. 西南大学学报, 2012, 34(3):76—82.
- [8] 袁俊杰,陶晓风. 四川名山—丹棱地区青衣江流域的砾石层特征及水系演化[J]. 地质学报, 2008, 28(1):6—12.
- [9] 李勇,黎兵,Steffen,等. 青藏高原东缘晚新生代成都盆地物源分析与水系演化[J]. 沉积学报, 2006, 24(3):309—320.

- [10] 李华勇, 明庆忠. 金沙江石鼓—宜宾段河谷—水系演化研究综述与讨论[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(2):50—55.
- [11] Hasano D. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods[J]. Environmental Geology, 2009, (56): 1405—1415.
- [12] Stank S. Fractal river networks of Southern Africa[J]. South African Journal of Geology, 2005, 108: 333—344.
- [13] 刘涓, 魏朝富, 张仕超, 等. 四川盆地丘陵山区局地水系空间格局与地形因子的耦合[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(8):965—971.
- [14] Francesca G, Giorgio R, Roberto R. A procedure for drainage network identification from geomorphology and its application to the prediction of the hydrologic response[J]. Advances in Water Resources, 2005, 28: 567—581.
- [15] 芮孝芳, 蒋成煜. 流域水文与地貌特征关系研究的回顾与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 444—449.
- [16] 王随继, 吴绍洪, 戴尔卓. 河流地貌参数统计关系反映的河性分异现象—以澜沧江云南段有关支流为例[J]. 自然科学进展, 2005, 15(7):824—829.
- [17] 周贵云, 刘瑜, 邬伦. 基于数字高程模型的水系提取算法[J]. 地理学与国土研究, 2000, 16(4):77—81.
- [18] 唐从国, 刘丛强. 基于 Arc Hydro Tools 的流域特征自动提取—以贵州省内乌江流域为例[J]. 地球与环境, 2006, 34(3):30—37.
- [19] Lin W, Chou W, Lin C. Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds[J/OL]. Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com).
- [20] 黄诗峰, 徐美, 陈德清. GIS支持下的河网密度提取及其在洪水危险性分析中的应用[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(4):129—132.
- [21] 曹建华, 袁道先. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[M]. 北京:地质出版社, 2005.
- [22] Glenn E, Elfatih A, Rafael L. On the sensitivity of drainage density to climate change[J]. Water resources research, 1998, 34:855—862.
- [23] Gregory E, Filippo C, Andrea R, *et al.* Statistical analysis of drainage density from digital terrain data[J]. Geomorphology, 2001, 36:187—202.
- [24] 林俊清. 喀斯特面积比重图与河网密度图的编制及其应用[J]. 贵州教育学院学报, 2000, 11(4): 55—58.
- [25] 梁虹, 王剑. 喀斯特地区流域岩性差异与洪、枯水特征值相关分析[J]. 中国岩溶, 1998, 17(1): 67—73.
- [26] Madduma B. Drainage density and effective precipitation[J]. Journal of Hydrology, 1974, 21(2): 187—190.
- [27] 杨明德, 谭明, 梁虹. 喀斯特流域水文地貌系统[M]. 北京:科学出版社, 1988.
- [28] 李瑞玲, 王世杰, 周德全, 等. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 314—320.
- [29] 李家平, 董祖培. 西部大开发中贵州水资源利用的探讨[J]. 人民珠江, 2002, 2:4—6.
- [30] Pan G, Wang L, Li R, *et al.* Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, (53):3—14.
- [31] Lu H, Wang X, An Z, *et al.* Geomorphologic evidence of phased uplift of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since 14 million years ago[J]. Science in China Ser. D Earth Sciences, 2004, (47): 822 —833.
- [32] 潘裕生. 青藏高原的形成与隆升[J]. 地学前缘, 1999, 6(3):153—163.
- [33] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京:科学出版社, 1987.
- [34] 程国繁, 徐安全. 试论“威宁—紫云”北西向构造带变形特征[J]. 贵州地质, 1998, 5(4): 311—320.
- [35] 贵州省地质矿产局. 贵州区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1987.
- [36] TD/T 1014—2007, 第二次全国土地调查技术规程[S].
- [37] 贺中华, 陈晓翔, 梁虹. 贵州省喀斯特流域赋水遥感定量研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(6):76—82.
- [38] 焦树林, 梁虹. 喀斯特流域岩性与枯水径流特征值的灰色关联度分析[J]. 中国岩溶, 2001, 20(4):274—278.
- [39] Derek F, Paul W. Karst Hydrogeology and Geomorphology[M]. New Jersey:John Wiley & Sons,Ltd, 2007.
- [40] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6):573—582.
- [41] 韩至钧, 金占省. 贵州省水文地质志[M]. 北京:地震出版社, 1996.
- [42] 李大通. 碳酸盐层的分类原则和确定类型的 BASIC 程序[J]. 1985, 4(4):349—352.
- [43] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3):274—279.
- [44] 聂跃平. 碳酸盐岩性因素控制下喀斯特发育特征:以黔中南为例[J]. 中国岩溶, 1994, 31(3):31—36.

- [45] 孙承兴, 王世杰, 周德全, 等. 碳酸盐岩差异性风化成土特征及其对石漠化形成的影响[J]. 矿物学报, 2002, 22(4): 308-314.
- [46] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学, 1999, 29(5): 441-449.

Drainage Network Distribution and Its Master Natural Factors in Guizhou Province

CHEN Wei-yan^{1,2}, WANG Shi-jie^{1,3}, BAI Xiao-yong^{1,3}, QIN Luo-yi⁴, ZHANG Si-yu^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Karst ecosystem observation research station in Puding, Chinese Academy of Sciences, Puding, 562100, China;
4. Guizhou Normal University, Guiyang, 550000, China)

Abstract: In order to analysis the characteristics of the spatial distribution of drainage network in karst area, the mean value of drainage network density in each type was calculated based on the overlay analysis of 1:50000 drainage network map and precipitation pattern, landform map, tectonics chart, slope map, lithology diagram, and the characteristics of spatial distribution of drainage network was analysed, by using GIS as the major analysis methods in Guizhou province. By calculating, the average density of drainage network is 0.78 km/km², affected by tectonic movement, it presents the characteristic of dense in eastern. The drainage network density in non-carbonate area is 1000.43 m/km², the limestone area is 597.16 m/km², the dolomite area is 779.41 m/km², the drainage network density and lithology has an obvious correlation that drainage network density in non-carbonate area is far higher than carbonate area, and drainage network density in dolomite area is higher than limestone area; In vertical space, When the slope is $\leq 2^\circ$, drainage network density is the largest, 1237.36 m/km², and when slope is $\geq 25^\circ$, drainage network density is 379.37 m/km², with the increase of slope, the drainage network density decreases obviously.

Key words: drainage network density; precipitation; tectonics; landform; slope; lithology