

川南叙大铁路沿线岩溶区伏流、暗河对比分析

范辰辰¹, 许模¹, 王梅¹, 赵瑞¹, 叶咸¹, 夏雪萍²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 2. 四川省蜀通岩土工程公司, 成都 610000)

摘 要:伏流与暗河均属地下暗流,是两种极为相似的现代地貌。虽然二者最终都以地下河出口的形式排泄出露,但实为不同的岩溶水文地质现象。伏流是地表水在岩溶地区的管道状潜伏段,而暗河是具有河流主要特征的岩溶水地下管道。通常在生产生活中并未严格界定,且已有研究大多也只对其概念进行了区分,二者的各项属性有何差异却鲜有提及。该文详细分析了川南古叙岩溶区 14 条伏流,24 条暗河各要素,包括:出口出露高程、发育层位、构造、所属水系、水化学和空间展布。通过对各因子的统计后发现,伏流和暗河之间存在较大差异性,且主要体现在出口出露高程、所属构造、水系、水化学和空间展布 5 个方面,并在统计结果的基础上分析各差异性产生的原因。这对于维持区内生态环境平衡,合理开发、利用地下河系,展开专水专用等具有重要意义。

关键词:水文地质; 对比分析; 川南; 伏流; 暗河

中图分类号:X143;TV131.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)02-0264-05

Comparative Analysis on the Disappearance of River and Underground River along the Xuda Railway in the South of Sichuan Province

FAN Chen-chen¹, XU Mo¹, WANG Mei¹, ZHAO Rui¹, YE Xian¹, XIA Xue-ping²

(1. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological

Environmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059,

China; 2. Sichuan Shutong Geotechnical Engineering Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: Both the disappearance of river and underground river are underground currents and the similar modern landscape. Though both of them drain in form of underground-flowing river exit, they are the different Karst hydrogeological phenomenon. Disappearance of river is the disappearance part of river in karst area while the underground river is the underground pipes with the main characteristics of river in karst area. They usually do not distinguish strictly in production and living and the only study about them is limited to the concepts, rarely studying about their characteristic differences. This paper analyzed 6 characteristics of 14 disappearance of river and 24 underground river, including the elevation of exit, stratum, structure, river system, water chemistry and space distribution. Based on the statistical results, there are large differences between them, especially in the elevation of exit, structure, river system, water chemistry and space distribution. Then this paper analyzes the reason for the existence of the differences. This result is helpful for maintaining the ecological environment balance, developing and making use of water resources effectively.

Key words: hydrogeology; comparative analysis; south Sichuan; disappearance of river; underground river

伏流与暗河是岩溶地区的重要水资源。地表河潜入地下后的形态一般被称为伏流,常形成于地壳上升,河流下切,河床纵坡降较大的地方,在深切峡谷两岸及河谷的上源伏流分布尤为显著^[1]。暗河是由地下水汇集而成的地下河道,具有一定范围的汇水区域,虽有出口,但无明显入口^[2]。通常我们将伏流和暗河均视为相同的岩溶形态,但事实上,他们的差异性是不容忽视的,与我们生产生活之间的相互关系也

不尽相同。本文依托地方铁路——叙大线,对沿线四川盆地的岩溶地下暗河和伏流进行对比分析。

1 工程概况与区域地质背景

叙大线铁路起于叙永,止于古蔺县大村镇,是一条地方运输铁路线。位于古蔺河南岸,沿线通过碳酸盐岩地段长约 32.79 km,占线路总长的 38.40%。涉及到众多岩溶形态和丰富的岩溶地下水,沿线共发

现暗河 24 条,伏流 14 条,总长度超过 120 km,集水面积达 480 km²,总流量超过 7 300 L/s,影响铁路工程设计与施工安全。同时,线路的施工也会打破该地区地下水生态环境平衡。线路隶属川南重镇泸州市的叙永、古蔺县境内,全长 85.39 km。线路涉及区属中亚热带季风气候。两县年平均气温 17.8℃,降雨量集中在 5—9 月。本区主要为低中山地貌,总体北低南东高,山体多东西走向,与构造线基本一致,高差悬殊,海拔高程 350~2 000 m,相对高差 200~700 m^[3]。区内水系较发育,以古蔺县箭竹坪一带为分水岭,箭竹坪以西为永宁河水系,以东为赤水河水系。主要河流有南门河、东门河、冷水河、古蔺河等。溪沟发育,呈树枝状展布,地下暗河与地表水相互贯通,河床纵坡陡,水流湍急。本区地层除第三系、石炭系、泥盆系缺失外,从侏罗系沙溪庙至奥陶系湄潭组均有出露。构造上属川南山字型构造影响范围,主要格局为以古蔺复式背斜为总体,呈近东西展布、向南突出的弧形褶皱。

2 岩溶水文地质条件

研究区位于四川盆地南缘山地与云贵高原过渡带^[4]。区内可溶岩层位众多,其中茅口组灰岩岩溶最发育,嘉陵江组、栖霞组次之,雷口坡组、奥陶系中上统稍弱。在大片裸露的质纯、层厚的碳酸盐岩地区,岩溶发育强烈,有利于大气降水及地表水的补给^[5]。岩溶水运动与循环受构造条件和水文网的控制,多分布在横切河溪地区,以纵向径流为主,横向径流为辅。隧址区北西部为岩溶槽型宽谷地貌,南东部则以岩溶山地为主。谷深坡陡,灰岩地区岩溶地貌显著,表面溶蚀严重,多石林、石柱等典型灰岩地貌特征,且溶蚀洼地,溶洞较多,水体交替循环加剧后,多形成较大规模的岩溶大泉及地下管道^[6]。明流、暗流交替出现,彼此相依共存,向河谷岸边及低洼地汇集,集中排泄(图 1)。

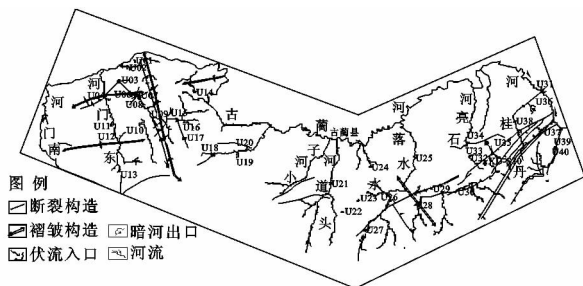


图 1 研究区地下河分布平面图

3 研究区内伏流、暗河对比分析

伏流与暗河同为地下暗流,但实质上两者具有显著差别。我们将河流由地表转入地下,从地下又复出地表的独特形态定义为伏流。通常包含进出口、伏流

洞及上覆山体(天生桥)3 个部分^[7],如图 2 所示;而暗河是由地下水文网汇集而成的地下河道,它具有一定范围的地下汇水流域,即是说,暗河虽有出口,但无入口^[8-10],如图 3 所示。

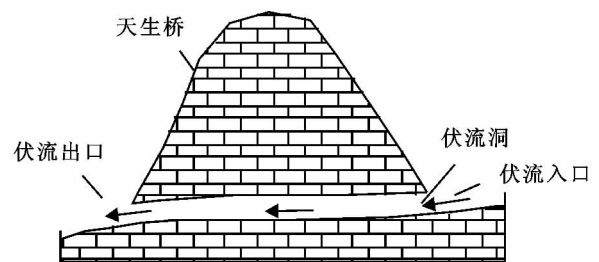


图 2 伏流示意图

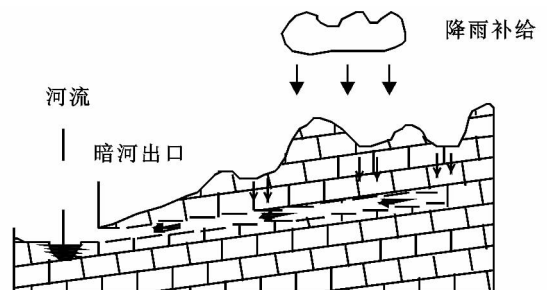


图 3 暗河示意图

在此,从两者发育的高程、地质条件、水系、水化学特征、空间展布 5 个方面对其分别进行统计分析^[11],详细论述伏流和暗河的区别。

3.1 出口高程

伏流和暗河两者出口高程值的差异性,以及与地表水系之间的垂直高程差的差异性是由多方面因素造成的,主要包括:地形地貌、地质构造、河流下切与地壳抬升速度关系等。在此,首先对本地区两者的出口高程数据分别进行统计分析:该地区伏流出口高程均值 507.6 m,其中最大值为 696 m,最小值为 404 m;暗河出口高程均值 705 m,其中最大值为 1 116 m,最小值为 398 m。两者均分布于河流两岸附近,伏流出口高程距离最近的地表主水体的平均高程为 221.6 m,暗河 139.4 m。由此可见,该地区伏流出口位置高程值较一致,且远离地表水体,而暗河则分布不均,高程分布范围更广,更贴近地表水体。从统计结果看来,两者出口高程主要集中在三个范围值,分别为 520 m、730 m、950 m,这和该地区晚近构造运动大面积上升的同时,间有短暂间歇紧密相关。

3.2 地质条件

地质构造与岩溶的发育强度及方向有着十分密切的关系,如地层的展布、产状,断裂的发育程度、方向、充填程度等控制了地下水的运动方向和地下水动态,从而也就决定了岩溶发育的强度、方向、规模大小及岩溶形态等^[12]。研究区内发育可溶岩的层位较多

且面积广泛,但伏流和暗河均只发育于三叠系嘉陵江、雷口坡和二叠系阳新组中。据统计,在该地区两者主要分布于 P_{1y} 地层中,其次为嘉陵江组,雷口坡组内不发育,这也与该地区岩溶发育状况程度相吻合。但也由此可见,古叙地区地层岩性对伏流、暗河发育的影响程度大致相同,两者无显著差别(图 4)。

作为排泄点的伏流、暗河,出口常发育在靠近排泄基准面附近,是在一个相对较长的地壳稳定时期由于岩溶作用形成的。区域地质构造控制了碳酸盐岩的分布和岩溶发育的强度及方向,从而控制地下河的发育分布情况。不同的构造形态将产生构造裂隙,这类裂隙是地下水活动的场所,是地下河发育的原始通道,控制地下河展布、径流方向^[13]。地质构造对地下河的控制包括以下四类:背斜、向斜、断裂及单斜地层。据本次调查,地下河系统集中分布在梯子岩背斜和柏杨林背斜附近,其余部位均较为分散。统计结果显示,影响伏流、暗河发育的主导因素均为背斜,其余依次为向斜、断层和单斜构造。但相比之下,伏流受背斜控制的影响作用更明显,有半数发育于背斜核部,而暗河受各构造因素影响程度较为平均,且从发育总数看来,远大于伏流。由此推测,伏流发育的构造条件相比暗河更为苛刻,裂隙管道发育不充分的地方不利于伏流的出现,但暗河却更容易成为可溶岩地区的一种地下水的主要排泄方式。故构造作用对伏流、暗河的发育展布起到了较为显著的作用,见图 4。

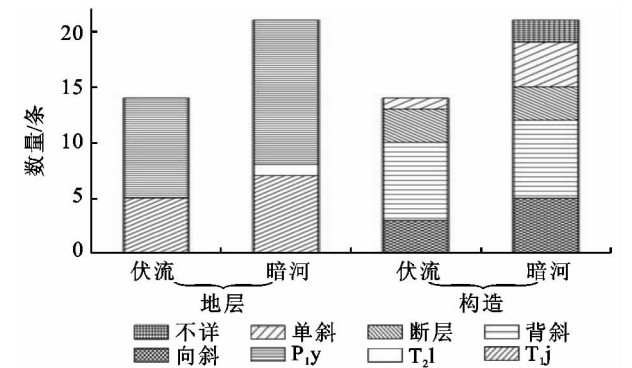


图 4 伏流、暗河数量与地层、构造关系

3.3 水系

各类水体经下渗成为地下水后通常会汇聚并集中排泄,从而形成了伏流和暗河,其排泄口通常都发育在区域最低排泄基准面附近,故水系也是影响伏流暗河出露的重要因素。在此选择以二、三级水系为基准,探讨伏流和暗河的异同。据此次调查,南门河水系内无地下河发育,而主要集中于东门河、古蔺河以及丹桂河水系中。但由于研究区范围内不同水系涵盖的可溶岩范围相差甚远,故在此选用地下河发育密度指标(s)为衡量标准,分析两者在不同水系中的分

布情况。其定义是,碳酸盐岩单位面积上地下河发育的条数,为便于计算采用 10 km^2 的碳酸盐岩出露面积为标准^[14],公式如下:

$$s=S/A$$

式中: S ——某一地区地下河总条数(条); A ——碳酸盐岩出露面积(10 km^2)。

经计算,丹桂河水系中伏流发育密度最大,占绝对优势。而暗河在三个水系中所占比例相当,东门河内的密度略大于其余两条水系。分析认为,由于不同地形地貌直接控制着地下水的水动力特征,制约着岩溶作用的强度,使其在不同的地形部位形成不同的岩溶形态。而丹桂河水系的侵蚀基准面最低,其范围内地形高差大,坡度陡,推测该地区河流下切速度较快,地表水主要顺沟渠排泄,后沿洞穴通道及溶蚀裂隙进入地下,集中溶蚀显著,故伏流发育更充分。而其他区域地形低洼,坡度平缓,地下水以水平运动为主,面状溶蚀占主导地位,故暗河发育充分^[15]。具体发育密度见表 1。

表 1 伏流、暗河发育所处水系统计

水系	东门河	古蔺河				丹桂
		德耀	小河子	水落河	石亮水	
伏流数	4	0	1	0	2	7
暗河数	7	3	2	4	2	3
伏流密度/ s	0.34		0.10			1.00
暗河密度/ s	0.59		0.38			0.43

3.4 水化学和同位素特征

由伏流和暗河的定义可知,两者之间最根本的差别在于:暗河为面状补给,无明显的进水口,伏流则为沟渠集中补给,有明显的线状补给端。不同的补给方式也决定了伏流和暗河的水化学特征的不同。故在此选取了该地区 7 组暗河,5 组伏流进行水化学简分析;另选 2 组暗河,4 组伏流进行 $^2\text{H}(\text{D})$ 、 ^{18}O 同位素分析测试。具体测试结果分析如下:

整体看来,测试水样中,伏流和暗河的阳离子均主要以 Ca^{2+} 为主, Na^+ 、 Mg^{2+} 次之, K^+ 最少。但阴离子组成方面,伏流主要以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主, Cl^- 最少;暗河主要以 HCO_3^- 为主,仅一组水样呈 SO_4-Ca 型。但该点矿化度为所有水样中最大,达 722 mg/l , $\text{pH}=4.5$ 也为所有水样中最低。故推测该点出现 SO_4^{2-} 含量偏高,较低 pH 值和较高矿化度值是受到附近磺厂排放出含 SO_4^{2-} 离子废水的影响。综上分析,该地区地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca}$ 型水,为典型的岩溶地区地下水类型。图 5 反映出研究区域内地下水的循环交替条件较好,得到大气降水补给的同时也得到其它水源的混合补给,地下水径流途径较长,岩石介质对于地下水化学类型的改造作用较为明显,矿化程度普遍较高。

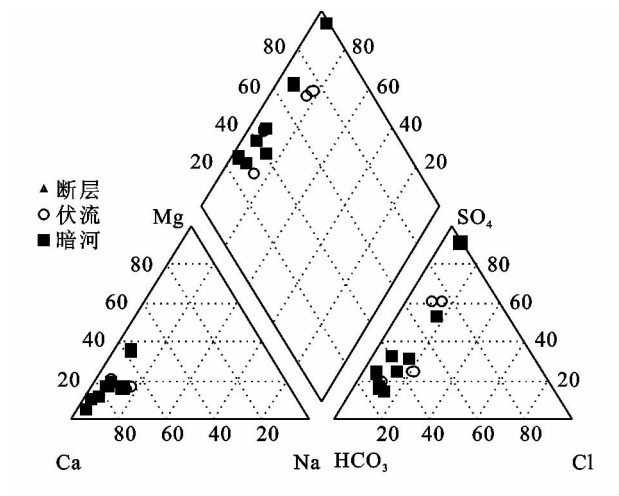


图 5 伏流、暗河水化学分区

4 组伏流出口的水化学数据分析显示,U05、U15、U36 的 SIC、SID 和 SIG 值均小于 0,可见其径流途径通畅,水岩作用不充分。唯一存在 U31 的 SIC、SID 和 SIG 值大于 0,但分析此伏流入口补给水源 U38 的化学成分可知,虽然 U31 的溶解度几乎达到饱和,但完全是因为补给伏流的水源本身就已达到饱和,且出入口的数据极其接近,也可说明伏流本身的水岩作用时间不长,物质成分交替程度不够,水体基本保持了入口端原有的化学性质。

7 组暗河水化学结果则一致表明,大多数暗河出口处水体的溶解度都已达到饱和状态,且矿化度基本为 250~400 mg/L,可见其径流途径一般通畅,水岩

作用时间较长。由此可见,伏流相较暗河而言,更多地保持了补给水源的性质,径流途中与岩体之间的相互作用较弱,径流途径更加通畅、迅速,如表 2 所示。

表 2 研究区地下水水样饱和指数表

暗河编号	水点性质	矿化度/ (mg·L ⁻¹)	SIC	SID	SIG
U15	伏流出口	237	-0.2107	-1.2126	-1.9831
U05	伏流	423	-0.7351	-2.2256	-1.2000
U38	伏流入口	382	0.5734	0.3776	-1.4136
U36	伏流出口	603	-0.0824	-0.8982	-0.9514
U31	伏流出口	256	0.3626	0.0404	-1.7885
U09	暗河	290	0.2529	-0.2576	-1.6688
U01	暗河	244	-0.0683	-0.4799	-1.9536
U26	暗河	333	0.6161	0.4393	-1.6259
U21	暗河	381	0.4046	0.0938	-1.4581
U23	暗河	271	0.7209	0.4320	-1.9381
U22	暗河	243	0.6306	-0.0619	-1.9649
U34	暗河	406	-0.8700	-2.5189	-1.2070

3.5 空间展布特征

地下河空间展布与区域环境有关,是地层岩性、地质构造、水系、气温及降雨等因素综合作用的结果。经现场调查及分析,虽然古叙地区伏流和暗河的平面展布情况类似,但纵向发育却呈现出明显的差异性。通过对 6 条伏流、11 条暗河的发育长度和进出口高差计算后可知,研究区内伏流的地下径流管道的平均斜率仅为 0.078,相较暗河 0.134 的斜率而言其值仅为暗河的 2/3^[16]。由此说明该地区伏流在地下的展布,相比暗河纵坡降更小,水流更平缓,如表 3 所示。

表 3 伏流、暗河空间展布统计

暗河伏流编号	出露 高程/m	地理位置	类型	补给 高程/m	长度/ m	高程差/ m	斜率	斜率 均值
U07	930	跑马井	伏流入口	696	3100	234	0.07	0.078
U05	361	湾基洞	伏流出口	1300	8600	939	0.11	
U39	860	大村镇下坝	伏流入口	500	2800	360	0.13	
U31	404	尹家岩隧道	伏流出口	537	6200	133	0.02	
U36	450	铁索桥南面	伏流出口	1050	6400	600	0.09	
U05	420	柏杨林背斜核部	伏流出口	660	5100	240	0.05	
U09	680	中坝天堂洞	暗河出口	1200	7700	520	0.07	0.134
U02	493	龙凤洞	暗河出口	1000	2260	507	0.22	
U01	632	小井坝出水洞	暗河出口	950	1850	318	0.17	
U25	523	山落窝公路下方	暗河出口	1000	6500	477	0.07	
U23	548	野人洞	暗河出口	1300	4000	752	0.19	
U20	829	二坡顶采石场	暗河出口	1100	4700	271	0.06	
U18	969	鱼洞	暗河出口	1460	4050	491	0.12	
U24	811	中坝隧道入口附近(此处两处补给)	暗河出口	1080	1600	269	0.17	
U27	1116	龙洞	暗河出口	860	3500	860	0.25	
U33	490	石屏乡磺厂天塘	暗河出口	1500	3000	384	0.13	
U21	568	三槽沟下游游泳池	暗河出口	750	6100	260	0.04	0.12
			暗河出口	1400	6900	832	0.12	

注:划线的数据代表伏流出口高程。

4 结论

川南古叙岩溶地区伏流所处高程较集中,对比暗河,出口位置相对于地表水体也更高,而暗河出口高

程分布散乱,距离地表水体更近;地下暗流主要分布在二叠系茅口组灰岩中,与该地区地层岩溶发育程度基本一致;从构造的角度可知,伏流分布更为集中,而暗河则相对均匀,且数量更多,由此推测伏流发育的

条件更加严格;水系方面,伏流发育的地区山体较为陡峭,地表水主要以沟渠形式排泄,而暗河所属地区山体更平缓,水体以面状下渗溶蚀为主;又经水化学和同位素检测,伏流径流通道更通畅,水岩作用不如暗河充分;最后通过计算两者垂向发育斜率,推测该地区伏流的地下管道更为平缓,纵坡降小于暗河。

川南古叙地区岩溶水资源相当丰富,对于该地区出现的暗河和伏流,附近村民多是放任自流,排入河中,未加利用,远未发挥其应有的经济价值^[17-20]。若能在掌握二者特性的基础上合理充分应用继而开展专水专用,将能更有效地提高岩溶水资源的利用率。

参考文献:

- [1] 杨益才,徐守平,杨昌辉,等.喀斯特伏流河段建库主要工程地质问题[J].地球与环境,2005,33(3):83-89.
- [2] GB12329-90.岩溶地质术语[S].1990.
- [3] 李孝颐,张忠举,王正中,等.四川省筠连幅 H-48-(33)叙永幅 H-48-(34)区域水文地质普查报告[M].四川省地质局二〇八地质队,1980:27-28.
- [4] 陈叙伦,刘世青.川南喀斯特发育史探讨[J].成都地质学院学报,1984(2):44-52.
- [5] 李扬红,邓英尔,于静,等.五指山隧道岩溶发育及涌水的特征研究[J].水土保持研究,2009,16(2):138-141.
- [6] 王中美,廖义玲,李明琴,等.贵阳市水文地质条件及环境效应研究[J].水土保持研究,2012,19(1):226-233.
- [7] 杨益才,徐守平,杨昌辉,等.喀斯特伏流河段建库主要工程地质问题[J].地球与环境,2005,33(3):83-89.
- [8] 王迪,许模,漆继红,等.滇东南丘北区峰丛—洼地地貌形态特征分析[J].中国岩溶,2010,29(3):239-245.
- [9] 漆继红,许模,杨华云,等.川东铜锣山背斜—南温泉背斜温泉水力联系分析[J].人民长江,2011,42(11):5-9.
- [10] 许模,王迪,漆继红.基于分形理论的喀斯特地貌形态分析[J].人民长江,2011,38(3):5-9.
- [11] 曹嘉一弘.四川盆地盆周山地地下河发育分布规律统计分析[D].成都:成都理工大学,2013.
- [12] 刘卫华,刘际国,杨家松,等.锦屏二级水电站辅助洞西端岩溶发育特征研究[C]//第三届全国岩土与工程学术大会论文集.2009:485-492.
- [13] 王锡魁,王德.现代地貌学[Z].2009:126-127.
- [14] 蒲俊兵,袁道先,蒋勇军.重庆市地下河的空间分布及水资源[J].水文地质工程地质,2009(2):34-39.
- [15] 刘细元,马振兴,杨永革,等.宜春—新余一带岩溶基本特征及发育规律分析[J].华东理工大学学报,2006,29(2):127-132.
- [16] 黄琨,武亚遵,万军伟.落马洞暗河发育特征及其洪涝成因分析[J].中国岩溶,2010,29(4):385-388.
- [17] 尹辉,蒋忠诚,罗为群,等.西南岩溶区水土流失与石漠化动态评价研究[J].水土保持研究,2011,18(1):66-70.
- [18] 孙晋玉,张强,许模,等.通海隧道施工涌突水灾害与环境影响研究[J].水土保持研究,2011,18(4):69-73.
- [19] 刘建,刘丹.岩溶隧道建设引起的地下水环境负效应研究:以铜锣山隧道为例[J].水土保持研究,2009,16(3):268-271.
- [20] 陈旭,许模,杜宇本等.保山隧道暗河管道系统及其对隧道影响研究[J].人民长江,2011,42(5):22-25.
- [21] 李宗省,何元庆,辛惠娟,等.我国横断山区1960—2008年气温和降水的时空变化特征[J].地理学报,2010,65(5):563-579.
- [22] 朱良燕.基于M-K法的安徽省气候变化趋势特征R/S分析及预测[D].合肥:安徽大学,2010.
- [23] 窦燕,陈曦,包安明,等.2000—2006年中国天山山区积雪时空分布特征研究[J].冰川冻土,2010,32(1):28-34.
- [24] 张世强,卢健,刘时银.利用TM高光谱图像提取青藏高原喀喇昆仑山区现代冰川边界[J].武汉大学学报:信息科学版,2001(5):435-440.
- [25] Paul F, Huggel C, Käab A, et al. Comparison of TM-derived glacier areas with higher resolution data sets [C]//EARSel Workshop on remote sensing of land ice and snow, Bern. 2002, 11(13.3).
- [26] 田洪阵,杨太保,刘沁萍.遥感技术的近40 a来敦德冰川变化和气候变化的关系研究[J].冰川冻土,2012,34(2):277-283.
- [27] 田洪阵,杨太保,刘沁萍.近40年来冷龙岭地区冰川退缩和气候变化的关系[J].水土保持研究,2012,19(5):34-38.
- [28] 贺晋云,张明军,王鹏,等.新疆气候变化研究进展[J].干旱区研究,2011,28(3):499-508.
- [29] 袁晴雪,魏文寿.中国天山山区近40 a来的年气候变化[J].干旱区研究,2006,23(1):115-118.
- [30] 王宁练,张祥松.近百年来山地冰川波动与气候变化[J].冰川冻土,1992,14(3):242-250.
- [31] 叶柏生,丁永建,刘潮海.不同规模山谷冰川及其径流对气候变化的响应过程[J].冰川冻土,2001,23(2):103-110.
- [32] Zhao H, Xu B, Yao T, et al. Deuterium excess record in a southern Tibetan ice core and its potential climatic implications[J]. Climate Dynamics, 2012, 38(9/10):1791-1803.
- [33] Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(9):663-667.
- [34] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(5):322-325.
- [35] 高晓清,汤懋苍,冯松.冰川变化与气候变化关系的若干探讨[J].高原气象,2000,19(1):9-16.
- [36] Liu C, Kang E, Liu S, et al. Study on the glacier variation and its runoff responses in the arid region of Northwest China[J]. Science in China series D: Earth Sciences, 1999, 42(1):64-71.

(上接第263页)