2018 年度重庆市出版专项基金资助项目 DOI:10.11721/cqnuj20190621

三峡地区资源环境生态研究

涪江上游下切深度、速率及它们对下切过程控制因素的约束*

陈 浩[1], 董廷旭[1], 李 勇[2], 文星跃[3]

(1. 绵阳师范学院 资源环境工程学院, 四川 绵阳 621006;
2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059;
3. 西华师范大学 国土资源学院, 四川 南充 637002)

摘要:【目的】对涪江上游下切过程的控制因素进行分析,有助于揭示青藏高原东缘地区流域地貌演化对内、外力因素的响应机制。【方法】以 ArcGIS 水文分析模块为技术平台,以涪江上游干流河道为中心线提取宽度为 10 km 的条带剖面,据此将涪江上游流经区域划分为岷山山脉区、川西高原区、盆地周缘低丘平坝区等 3 个地貌单元。分别计算不同地貌单元河流的切割深度和切割速率,以此为基础,将侵蚀基准面下降、气候转湿等外力因素对涪江下切过程的控制作用约束为一个常量。【结果】虽然不同地貌单元隆升速率存在较大差异,但内、外力因素对整个涪江上游河段下切过程的贡献比值较为一致,即涪江上游干流河道对流经区域地表的切割,大致 28%为构造隆升所贡献,72%为侵蚀基准面下降、气候转湿等外力因素所贡献。【结论】应用条带剖面提取法对涪江上游下切深度及内、外力因素对涪江下切过程的贡献比值进行标定,可为河流地貌发育机制的定量研究提供方法参考。

关键词:涪江上游;下切深度;下切速率;控制因素

中图分类号:P94 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6693(2019)06-0053-05

目前河流下切速率与隆升速率的相互关系已成为构造地貌学研究的前沿问题[1]。一些学者将河流阶地记录的下切速率等同于隆升速率[2-4],实际上,河流下切是地表隆升、侵蚀基准面下降、气候转湿等内、外力因素共同作用的结果。岷山山脉是岷江、涪江两条大河的发源地,由于岷江是长江的一级支流且流域面积相对更大,因而,以往对该区域河流地貌的研究主要集中于对岷江流域地貌特征的探讨[5-13],有关涪江流域地貌形态及它对新构造隆升的响应研究却很少报道。本研究通过对数字高程模型(Digital elevation model, DEM)数据进行系统处理,提取涪江上游干流河道东西两侧各 5 km 范围的条带剖面进行综合分析,探讨涪江上游切割深度、切割速率及它们对下切过程控制因素的约束。

1 研究区概况

涪江发源于岷山雪宝顶北坡,干流全长 675 km,是嘉陵江右岸的最大支流,也是四川省腹地的一条重要河流[14]。本研究选取江油市龙凤镇以北的涪江上游流域作为研究区域,其中:涪江源头至平武县水晶镇一带的河段穿行于岷山山脉的河谷地带,水流深切,两岸峰峦叠嶂、绝壁对峙;平武县水晶镇至江油市武都镇的涪江河段流经山势渐低的川西高原地区,两岸断续有河流阶地分布;涪江干流河道通过武都镇之后,进入盆地周缘的低丘平坝区域,河谷相对开阔,河床比降减小(封二彩图 1)。研究区域气候类型以亚热带季风气候为主,多年平均气温为 14 ℃~18 ℃,年平均降水量约为 800~1 200 mm,夏季高温多雨,冬季温和湿润,大气降水为涪江流域径流的主要来源[15]。研究区内主要河流包括涪江干流及呈不对称羽状分布的火溪河、平通河、湔江等数十条支流。该区域主要活动构造带为岷江断裂和虎牙断裂所夹持的岷山构造带,呈近南北向展布的岷江断裂、虎牙断裂均表现为逆冲兼左旋走滑特征。

* **收稿日期:**2019-03-26 **修回日期:**2019-10-26 **网络出版时间:**2019-11-25 10:34
资助项目:国家自然科学基金(No. 41671220);四川省科技厅科技计划项目(No. 2019YJ0496);四川省教育厅自然科学基金(No. 14ZB0265)
第一作者简介:陈浩,男,副教授,博士,研究方向为构造地貌与第四纪环境,E-mail:chenhao11611@163.com
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20191125.1033.004.html

2 分析方法

DEM是用有序数值阵列形式表示地面高程的一种实体地面模型,是通过地形高程数据实现对地形的数字化模拟。在涪江上游流域数字高程模型上,以涪江源头作为统计起始点、涪江干流河道作为中心线、距离干流河道东西两侧各5 km的缓冲区域作为分析区(封二彩图1)。在这个条带状区域内,沿着长轴将它分割为100个段落,分别统计每一段区域内的最大海拔点高程,从而获得最大海拔高程剖面。最大海拔高程剖面代表涪江下蚀后的残留山顶面,残留山顶面与涪江下蚀后的河床面高程之差即为涪江的下切深度。以不同河段下切深度的统计分析为基础,对涪江上游干流河道流经区域进行地貌类型划分和下切速率计算,从而探讨河流下切速率与表面隆升速率之间的定量关系,据此确定两者之间的约束系数。

3 结果分析

3.1 地貌区划分

从图2可以看出,距统计起始点约0～67.5 km处是一个地形陡变带,山顶面的海拔高程从4 500 m以上迅速下降为2 400 m左右。通过公式:

$$\text{河道坡降指数}=\frac{\text{起点高程}-\text{终点高程}}{\text{统计距离}}\times 100\%,$$

计算得到此段的河道坡降指数为2.79,结合封二彩图1可以看出,该段位于岷江断裂和虎牙断裂所夹持的岷山山脉区。距起始点大约67.5～205 km处,各山顶面最高点高度相对一致,海拔高程范围为2 000～2 500 m,该段的河道坡降指数下降为0.39。该河段主要流经川西高原区,与岷山山脉区相比,地形起伏度相对较小。距起始点205 km以上,涪江进入低丘平坝区(以龙门山断裂带挤压形成的压陷盆地为基底,涪江等河流携带的砂砾物在压陷盆地处沉积而成),山顶面高程陡然下降为500～700 m左右,且该段的河道坡降指数仅为0.19。上述分析表明,涪江上游流经区域可分为3个较大尺度地貌单元:岷山山脉区、川西高原区和盆地周缘低丘平坝区(四川盆地西缘)。

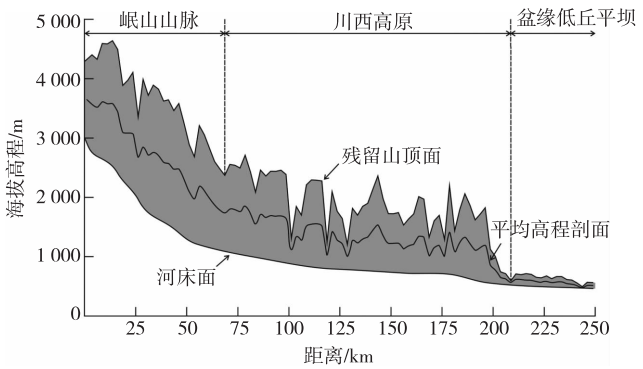


图2 涪江上游流域条带剖面

Fig. 2 The swath profile in the upper reaches basin of Fujiang river

3.2 下切深度对比

如前所述,河流下切深度为残留的山顶面与河床面的海拔高程之差,即图2中的灰色区域。从涪江上游下切深度的变化特征可以看出,在不同地貌区,河道的切割深度存在明显差异。计算可知,在岷山山脉区,涪江的平均切割深度为1 838 m;在川西高原区,平均切割深度为1 096 m;在盆缘低丘平坝区,河流切割深度明显减小,平均值仅为131 m。从图2可以看出,不同地貌区内部河流切割深度相对稳定,并与不同地貌单元表面隆升幅度呈明显正相关关系,即:在隆升幅度越大的区域,河道切割深度越大;反之在隆升幅度较小的相对平坦区域,水系切割深度亦愈小。

3.3 下切速率对比

已知不同地貌区河道切割深度,求取相应区域涪江干流河道下切速率,需要对涪江的形成时间进行推定。白毛伟等人[14]对涪江山前冲积扇进行了较为系统的研究,其中最古老冲积扇位于江油断裂南西侧山前盆地。该冲积扇主要由呈灰褐色、黄褐色的松散砾石组成。砾石成分以石英岩、闪长岩为主,填隙物为钙泥质胶结。采集

冲积扇沉积样品并进行 Al-Be 埋藏年代测试分析，确定该套砾岩的最早沉积年代为 1.84 Ma，相当于早更新世。另外，涪江冲积扇发育的砾石层的胶结程度和沉积特征都与大邑砾岩相似。孔平等人[16]通过宇宙核素^{10}Be、^{26}Al 埋藏年龄测试分析，获得大邑砾岩的沉积年龄为 2.0 Ma，测试结果与白毛伟等人[14]获得的涪江古冲积扇沉积年龄相近。由于涪江最古老冲积扇是涪江形成的沉积记录，因此可以将涪江最古老冲积扇沉积物的形成时间推定为涪江的形成时间。以此为基础，根据不同地貌区涪江河段的切割深度和涪江的形成时间，计算出岷山山脉区、川西高原区、盆缘低丘平坝区等 3 个地貌单元的河流下切速率分别为 0.99，0.59 和 0.07 mm·a^{-1}，可以看出，涪江河道的下切速率在不同地貌区存在明显差异，与下切深度的情况类似，涪江下切速率与流经区域的隆升幅度呈较为明显的正相关关系，即隆升幅度越大，流经该区域的河流下切速率越大。

4 下切过程的控制因素

河道下切过程的控制因素主要包括地表隆升、侵蚀基准面下降、气候转湿等。其中地表隆升是断裂活动、岩层褶皱变形等内力作用驱动的结果，侵蚀基准面下降、气候转湿是大气圈层活动等外力作用驱动的结果。鉴于青藏高原东缘河流下蚀的局部侵蚀基准面为长江，该局部侵蚀基准面控制了青藏高原东缘的地形、河流下切速率和四川盆地的沉积作用[1]；加之就整个青藏高原以及东西向中央造山系统而言，整个涪江水系应属于微观尺度水系系统，同时流域盆地又整体处于控制中国大陆气候分区的秦岭造山带以南[13]；因而如果存在气候及侵蚀基准面变化对于水系发育的影响，理论上这种控制对整个流域盆地来说应该是一致的。参考李勇等人[1]对青藏高原东缘晚新生代河流下切速率与表面隆升速率之间定量关系的计算方式，将侵蚀基准面下降、气候转湿等外力因素对涪江下切过程的控制作用约束为一个常量(C)，并据此建立关系式：$V_e = V_u \times C$。其中，V_e 为涪江上游干流河道下切速率；V_u 为涪江上游干流河道流经区域的隆升速率。

李勇等人[1]对青藏高原东缘地区表面隆升速率的反演结果表明，青藏高原内部区(川西高原)表面隆升速率为 0.11～0.20 mm·a^{-1}，相对稳定；山前冲积平原区(成都平原西缘)是表面隆升速率较小的稳定带，表面隆升速率仅为 0.03～0.05 mm·a^{-1}；谭锡斌[17]通过对岷山地区缩短速率的研究，揭示出岷山的表面隆升速率为 0.2～0.4 mm·a^{-1}。根据涪江上游干流河道流经地貌区的隆升速率和相应区域河道的下切速率，计算出侵蚀基准面下降、气候转湿等外力因素对涪江下切过程的约束系数 C 的范围为 2.33～2.95(表 1)。计算结果表明，涪江上游干流河道虽流经不同地貌区，但地表隆升等内力因素和侵蚀基准面下降、气候转湿等外力因素对河流下切的贡献比值较为一致，即整个涪江上游的下切过程，内力作用(地表隆升)和外力作用(侵蚀基准面下降、气候转湿)的贡献比大致为 1∶2.6。换言之，涪江上游干流河道对流经区域地表的切割，约 28% 为构造隆升所贡献，72% 为侵蚀基准面下降、气候转湿等外力因素所贡献。

表 1　河道下切过程控制因素约束系数

Tab. 1　Constraint coefficient of controlling factors of erosion process

参数	岷山山脉区	川西高原区	盆缘低丘平坝区
河道下切深度/km	1 838	1 096	131
河道下切速率/(mm·a^{-1})	0.99	0.59	0.07
地表隆升速率/(mm·a^{-1})	0.40	0.20	0.03
约束系数	2.48	2.95	2.33

5 结论

通过条带剖面的提取对涪江上游干流河道流经区域的地形地貌进行了定量分析，从而将该区域划分为岷山山脉区、川西高原区、盆缘低丘平坝区等 3 个地貌单元。根据残留山顶面与河床面的海拔高程差及涪江的形成时间，计算出不同地貌区河道的切割深度和切割速率。结果表明：涪江下切深度、下切速率与流经区域的隆升幅度呈明显正相关关系，即隆升幅度越大的区域河道切割深度越深、河流下切速率越快。根据涪江干流河道流经区域的表面隆升速率和相应区域的河流下切速率，将侵蚀基准面下降、气候转湿等外力因素对涪江下切过程的控制作用约束为一个常量，通过约束系数的计算结果可以看出，虽然不同地貌单元的隆升速率存在较大差异，但

内、外力因素对整个涪江上游河段下切过程的贡献比值较为一致(外力作用的约束系数范围为2.33～2.95),这与研究区域同处秦岭造山带以南的亚热带季风气候区、共有长江这一共同的局部侵蚀基准面相吻合。综上所述,内力因素(地表隆升)和外力因素(侵蚀基准面下降、气候转湿)对涪江上游干流河道下切过程的贡献率大致为28%和72%。上述结果提示,河道下切速率和地表隆升速率存在一定的线性关系,约束系数虽因地而异,但在一定时空尺度内数值保持相对稳定,因而不能将某处的河流下切速率等同于该处的表面隆升速率。本研究主要基于ArcGIS条带剖面提取方法讨论涪江上游干流河谷剖面样式特征,在今后的工作中,拟以本研究结果为基础,以ArcGIS水文分析模块为技术平台,系统提取涪江上游流域盆地地表水系网络和涪江干流东西两侧亚流域盆地,并对各亚流域盆地的面积、周长、水系总长度、水系分支比、流域盆地演化阶段进行统计分析,从而进一步对涪江上游水系平面样式特征进行深入研究。

参考文献:

[1] 李勇,DENSMORE A L,周荣军,等.青藏高原东缘数字高程剖面及其对晚新生代河流下切深度和下切速率的约束[J].第四纪研究,2006,26(2):236-243.
LI Y,DENSMORE A L,ZHOU R J,et al. Profiles of digital elevation models (DEM) crossing the eastern margin of the Tibetan plateau and their constraints on dissection depths and incision rates of late Cenozoic rivers[J]. Quaternary Sciences,2006,26(2):236-243.

[2] 王国芝,王成善,刘登忠,等.滇西高原第四纪以来的隆升和剥蚀[J].海洋地质与第四纪地质,1999,19(4):67-74.
WANG G Z,WANG C S,LIU D Z,et al. Uplift and denudation of the western Yunnan plateau in Quaternary[J]. Marine Geology and Quaternary Geology,1999,19(4):67-74.

[3] 潘保田,邬光剑,王义祥,等.祁连山东段沙沟河阶地的年代与成因[J].科学通报,2000,45(24):2669-2675.
PAN B T,WU G J,WANG Y X,et al. Age and origin of Shagou river terrace in the eastern section of Qilian mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(24): 2669-2675.

[4] MADDY D. Uplift-driven valley incision and river terrace formation in southern England[J]. Journal of Quaternary Sciences,1997,12(6):539-545.

[5] 葛永刚,庄建琦.5.12汶川地震对岷江上游河道的影响:以都江堰—汶川河段为例[J].地质科技情报,2009,28(2):23-28.
GE Y G,ZHUANG J Q. River channel change of the upper of Minjiang river by 5.12 Wenchuan earthquake: a case study of the section of Dujiangyan-Wenchuan[J]. Geological Science and Technology Information,2009, 28(2):23-28.

[6] 李勇,曹叔尤,周荣军,等.晚新生代岷江下蚀速率及其对青藏高原东缘山脉隆升机制和形成时限的定量约束[J].地质学报,2005,79(1):28-37.
LI Y,CAO S Y,ZHOU R J, et al. Late Cenozoic Minjiang incision rate and its constraint on the uplift of the eastern margin of the Tibetan plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2005,79(1):28-37.

[7] 何玉林.胡先明.岷江—沱江水系及新构造应力场[J].四川地震,1992(3):30-34.
HE Y L. HU X M. Drainage system of Minjiang and Tojiang rivers and neotectonic stress field[J]. Sichuan Earthquake,1992(3):30-34.

[8] 马保起,苏刚,侯治华,等.利用岷江阶地的变形估算龙门山断裂带中段晚第四纪滑动速率[J].地震地质,2005,27(2):234-242.
MA B Q,SU G,HOU Z H, et al. Late Quaternary slip rate in the central part of the Longmenshan fault zone from terrace deformation along the Minjiang river[J]. Seismology and Geology,2005,27(2):234-242.

[9] 高玄彧,李勇.岷江上游和中游几个河段的下蚀率对比研究[J].长江流域资源与环境,2006,15(4):517-521.
GAO X Y,LI Y. Comparison on the incision rate in the upper and middle reaches of Minjiang river[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2006,15(4):517-521.

[10] 张岳桥,杨农,孟晖.岷江上游深切河谷及其对川西高原隆升的响应[J].成都理工大学学报(自然科学版),2005,32(4):331-339.
ZHANG Y Q,YANG N,MENG H. Deep-incised valleys along the Minjiang river upstream and their responses to the uplift of the western Sichuan plateau,China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),2005,32(4):331-339.

[11] 杨农,张岳桥,孟晖,等.川西高原岷江上游河流阶地初步研究[J].地质力学学报,2003,9(4):363-370.
YANG N,ZHANG Y Q,MENG H,et al. Study of the Minjiang river terraces in the western Sichuan plateau[J]. Journal of Geomechanics,2003,9(4):363-370.

[12] 王兰生,王小群,许向宁,等.岷江上游近两万年前发生了什么事件[J].地学前缘,2007,14(4):189-196.
WANG L S,WANG X Q,XU X N,et al. What happened on the upstream of Minjiang river in Sichuan province 20000 years ago[J]. Earth Science Frontiers,2007,14(4):189-196.

[13] 张会平,杨农,张岳桥,等.岷江水系流域地貌特征及其构

造指示意义[J]. 第四纪研究,2006,26(1):126-135.
ZHANG H P, YANG N, ZHANG Y Q, et al. Geomorphology of the Minjiang drainage system(Sichuan,China) and its structural implications[J]. Quaternary Sciences, 2006,26(1):126-135.

[14] 白毛伟,谢小平,陈芝聪,等. 龙门山北东段山前涪江第四纪冲洪积扇地貌演化及其构造响应[J]. 沉积学报,2017,35(1):85-92.
BAI M W, XIE X P, CHEN Z C, et al. Geomorphological evolution of Quaternary alluvial fans and its response to tectonic activity along the Fujiang river, northeastern Longmen mountains[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017,35(1):85-92.

[15] 陈芝聪. 基于 DEM 的龙门山地区涪江上游构造地貌与水系演化研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学,2017.
CHEN Z C. Study on structural geomorphology and water system evolution of the upper reaches of Fujiang river in Longmens mountains area base on DEM[D]. Qufu Normal University,2017.

[16] KONG P, ZHENG Y, FU B H. Cosmogenic nuclide burial ages and provenance of late Cenozoic deposits in the Sichuan basin: implications for early Quaternary glaciations in east Tibet[J]. Quaternary Geochronology, 2011, 6(3/4):304-312.

[17] 谭锡斌. 龙门山推覆构造带新生代热演化历史研究及其对青藏高原东缘隆升机制的约束[J]. 国际地震动态,2013,43(10):44-46.
TAN X B. Study on Cenozoic thermal evolution history of Longmen mountains nappe tectonic belt and its restriction on uplift mechanism of eastern margin of Qinghai-Tibet plateau[J]. Recent Developments in World Seismology, 2013,43(10):44-46.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Dissection Depths of the Upper Reaches of Fujiang River and Their Constraints on Controlling Factors of Erosion Process

CHEN Hao[1], DONG Tingxu[1], LI Yong[2], WEN Xingyue[3]

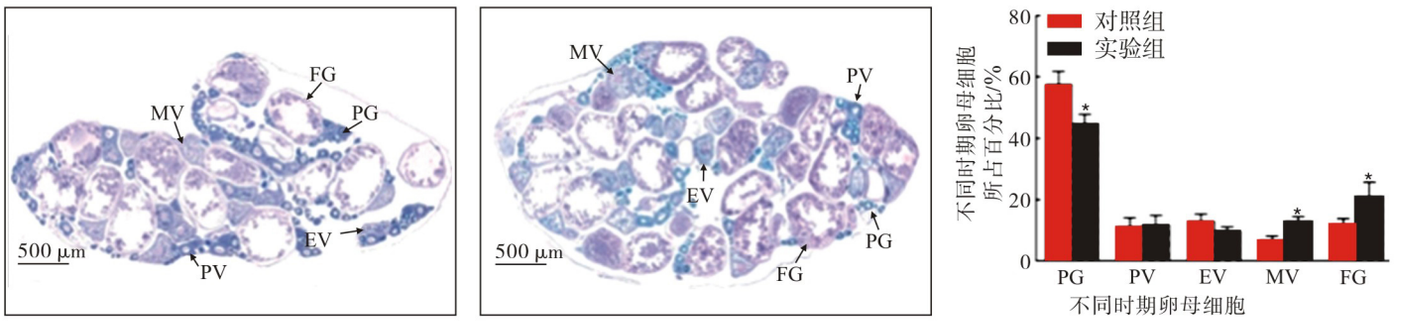
(1. College of Resources and Environmental Engineering, Mianyang Teachers' College, Mianyang Sichuan 621006;
2. National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;3. College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong Sichuan 637002, China)

Abstract: [**Purposes**]The response mechanism of river geomorphological evolution in the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau was revealed by analyzing the controlling factors of erosion process in the upper reaches of Fujiang river basin. [**Methods**]The swath profile of main stream of the upper reaches of Fujiang river was extracted and based on hydrological analysis module of ArcGIS, the drainage basin was divided into Minshan mountain and western Sichuan plateau and low hill and flat area of basin margin. Dissection depths and incision rates of the upper reaches of Fujiang river on different geomorphology region was calculated, controlling of exogenous forces to erosion process were intended to be constant. [**Findings**]The results of analysis indicate that there are differences for uplift rate on the different geomorphology region, but the effect proportion of endogenous forces and exogenous forces to erosion process were consistent in the upper reaches of Fujiang river basin. The effect proportion of endogenous force(tectonic uplift) and exogenous forces (climate change and base level change of erosion) is 28% to 72%. [**Conclusions**]Dissection depths of the upper reaches of Fujiang river and their constraints on controlling factors of erosion process were calibrated and based on extraction method of swath profile, the method reference was provided for quantitative research of the development of rivers geomorphology.

Keywords: upper reaches of Fujiang river; dissection depth; incision rate; controlling factor

(责任编辑 黄 颖)

（接正文42页）



a　对照组卵巢组织学结构　　b　实验组卵巢组织学　　c　卵巢中不同时期的卵母细胞所占百分数

注：PG: 初级生长期；PV: 卵黄发生前期；EV: 卵黄发生早期；MV: 卵黄发生中期；FG: 成熟期；*表示组间数据差异具有统计学意义(p<0.05)。下同。

图1　Cd^{2+}暴露影响成年雌性斑马鱼卵巢发育

Fig. 1　Cd^{2+} exposure affects development of ovary in adult female zebrafish

（接正文48页）

注：底图来源于重庆市规划和自然资源局网站“重庆市标准地图服务”提供的“城口县行政区划”，审图号:渝S2016)062号。

图1　城口县蝴蝶样本采集分布地

Fig. 1　The distribution of butterfly specimencollected in Chengkou county

（接正文53页）

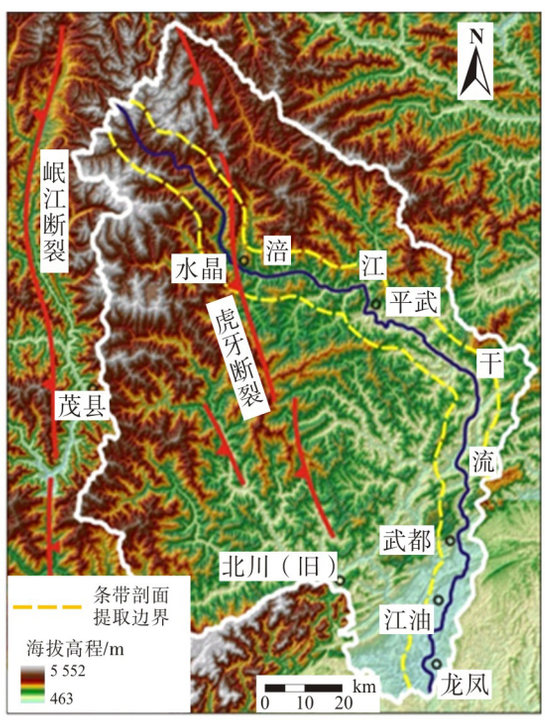


图1　涪江上游流域条带剖面提取位置

Fig. 1　The chart location of swath profile in the upper reaches basin of Fujiang river

（接正文107页）

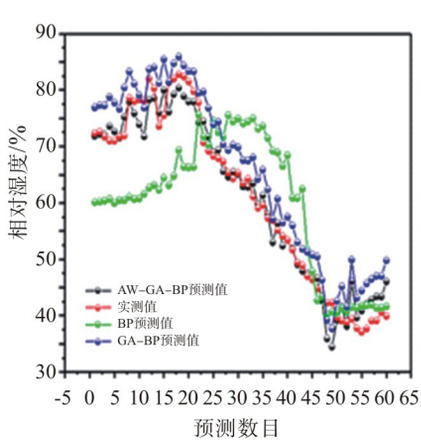


图4　相对湿度预测值和实测值对比

Fig. 4　Comparison based on predicted and measured values of relative humidity

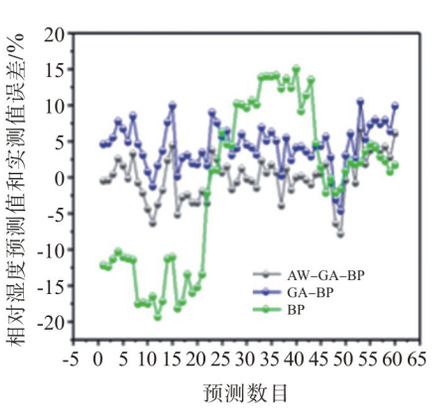


图5　相对湿度预测值和实测值误差对比

Fig. 5　Comparison of errors based on predicted and measured values of relative humidity

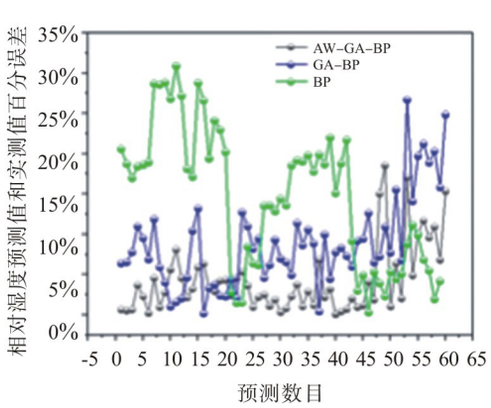


图6　相对湿度预测值和实测值百分误差对比

Fig. 6　Percentage error comparison based on predicted and measured values of relative humidity