

基于 ETM+和 DEM 的奉化江流域地貌提取与计量分析

陈鹏程, 杨晓平*, 袁麒麟, 梁贤军

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 利用 ETM+遥感解译技术以及 DEM 空间分析技术, 提取了奉化江的河系结构、流域几何特征等地貌参数, 利用统计软件, 对流域地貌形态进行了计量分析. 结果表明: (1)利用 ETM+与 DEM 数据所提取的流域面积和干流长度与真实值基本吻合; (2)河道分叉比、河道长度比、河道纵比降比三者之间存在一定的相关性; (3)通过对支流纵剖面函数拟合, 推测三大支流的发育次序为剡江、县江、鄞江; (4)利用 S-A 模型得出, 奉化江三大支流的基岩性河段基本处于均衡状态.

关键词: 奉化江; 流域地貌; 计量分析

中图分类号: P931.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2013) 04-0095-06

流域地貌不同于河流地貌, 它是从宏观的角度分析特定区域的地貌特征. 如何有效地提取大范围的地貌信息, 长期困扰地貌工作者. 利用传统的基于纸质地图提取的技术手段, 虽精度高, 但工作量大, 且效率低下^[1]. 单纯的利用遥感图像进行分析, 其提取的信息量十分有限^[2]; 单纯地利用 DEM 数据提取地貌特征, 在部分地势较为平坦而且海拔高度较低的地区, 提取结果极易失真^[3]. 笔者尝试利用 ETM+遥感图像和 DEM 数据对流域地貌进行提取, 以实现二者的优势互补.

1 研究区域概况

奉化江地处宁波盆地的中西部地区, 由 3 条支流构成, 即剡江、县江(包括东江)、鄞江, 其中剡江为奉化江的主源. 剡江大约在方桥三江口处, 与县江和鄞江汇合, 之后称为奉化江^[4].

奉化江流域内两大山脉为位于流域东侧的天台山脉和位于其西侧的四明山脉. 根据前人研究结果^[5-6]可知, 奉化江干流及其支流处于一个东北—西南走向的幔凹区的东北面, 研究区域的东侧与北侧为幔隆区, 其等深线由西南向东北逐步递减, 大致形成一个向东北倾斜的坡面. 加上当地属于

亚热带季风区, 降水较多, 侵蚀剧烈, 故形成了水系发达、河网密布的低山丘陵地貌.

2 研究方法与结果

2.1 研究方法

ETM+多波段的假彩色图像组合可以为后续的地貌提取提供条件. 根据研究, 并经反复试验认为, ETM+543 波段的 RGB 组合能较好地反映山体的实际颜色^[7], 解译效果也较好. 原始获得的 DEM 数据中含有大量的冗余数据, 需要对其裁剪. 为方便与 ETM+遥感融合, 本次裁剪范围选择遥感图像范围.

笔者采用 ESRI 公司开发的 Arc Hydro Tools 插件, 对 DEM 数据进行平整、嵌入主干河网、坡度嵌入、填洼、汇流、河网识别之后, 得到模拟水系, 利用 Arcgis 水文分析工具进行河流的自动分级(采用 Strahle 分级法). 利用属性信息得到各个河道的长度、平均比降等. 用 Arc Hydro Tools 插件中流域盆地分析工具, 提取典型的流域地貌, 如流域盆的面积、长度和宽度.

2.2 流域基本特征与流域盆地提取结果

利用 Burn-In 方法以及河网识别得到流域河

收稿日期: 2013-03-14.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journaljg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(41171073); 浙江省自然科学基金(Y5110321); 浙江省科技厅公益项目(2010C33155); 宁波市自然科学基金(2010A610105); 宁波大学学科项目(XKL11D2069).

第一作者: 陈鹏程(1989—), 男, 浙江温州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 资源环境. E-mail: cpc12@126.com

*通信作者: 杨晓平(1957—), 男, 浙江绍兴人, 副教授, 主要研究方向: 第四纪地质地貌. E-mail: yxpnbu@126.com

网,为检验本次河网的提取效果,将提取到的河网与 ETM+遥感图像进行叠加,结果如图 1 所示.

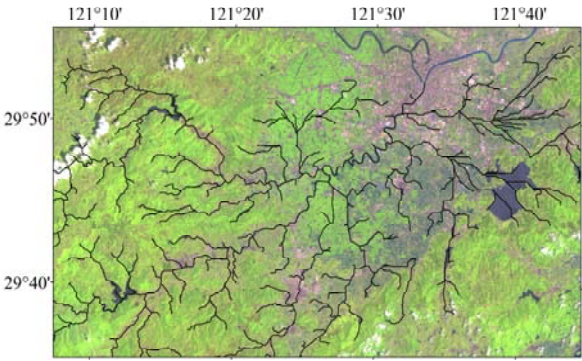


图 1 流域内河网与 ETM+影像融合示意图

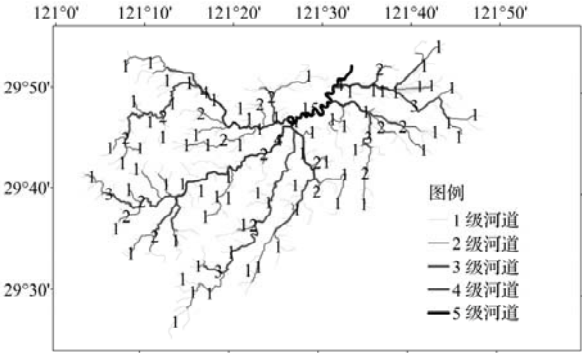


图 2 流域内河道分级图

从图 1 可看出,经多次试验,数字河网的提取效果令人满意,仅在平原地区存在一些与实际地表河网不符的河道,山区提取的效果较好.由河网等级提取结果可知,奉化江流域内河道最高级别

为 5 级,鄞江、剡江、县江(包括东江)三大支流均属 4 级,其结果如图 2 所示.

利用 Arcgis 水文分析工具和 Arc Hydro Tools 插件中的 Watershed Processing 工具,提取奉化江干流及其支流的流域范围如图 3 所示.流域内河道数量、平均长度、平均比降、各个流域的几何特征见表 1 和表 2.



图 3 奉化江流域划分图

3 结果分析

3.1 河系结构分析

3.1.1 河道数量与河道级别分析

Horton 认为,同一流域内的各级河道数量与河道级别呈现反几何数级关系^[10],且第 1 项是分叉比,于是提出了如下的关系模型:

$$Nu = R_b^{(s-u)} (u \leq S),$$

式中: Nu 为 u 级河道数, R_b 为分叉比, S 为流域内最

表 1 奉化江干流及其支流各级河道的平均长度和平均比降

流域	一级			二级			三级			四级			五级		
	数量	长度/ km	比降/ %	数量	长度/ km	比降/ %	数量	长度/ km	比降/ %	数量	长度/ km	比降/ %	数量	长度/ km	比降/ %
奉化江	261	2.083	2.784	59	4.411	1.155	14	12.683	0.318	6	14.776	0.068	1	27.727	0.001
剡江	54	1.987	5.229	14	4.229	2.234	3	11.037	0.673	1	32.906	0.094	—	—	—
县江—东江*	65	2.060	1.450	13	4.494	0.638	3	19.018	0.138	1	11.698	0.003	—	—	—
鄞江	70	2.085	4.616	14	5.122	1.950	3	14.745	0.544	1	24.651	0.232	—	—	—

注: *县江、东江在方桥附近汇合之后注入奉化江,故将二者流域合并.

表 2 奉化江流域地貌基本特征

流域	面积/km ²	长度/km	平均宽度/km	河网密度	形状系数	平均高度/m	水道频度
奉化江	2167.265	93.640	23.145	0.507	0.247	146.390	0.158
剡江	502.203	48.427	10.370	0.463	0.214	447.696	0.143
县江—东江	538.570	53.072	10.148	0.465	0.191	314.059	0.152
鄞江	556.624	41.274	13.486	0.515	0.327	358.344	0.157

高级的河道级别. 对 Nu 和 $s-u$ 进行指数曲线回归, 结果见表 3.

表 3 Horton 河数律指数模型回归汇总

流域	模型汇总			参数估计值	
	R^2	F	sig	$\ln(R_b)$	R_b
奉化江	0.997	1217.270	0.000	1.385	3.996
剡江	0.998	1485.904	0.000	1.310	3.706
县江—东江	0.996	790.351	0.000	1.339	3.817
鄞江	0.996	762.338	0.000	1.366	3.919

注: R^2 值为检验方程的拟合程度, F 为方差检验数值, sig 为显著水平双尾检验数值.

从表 3 可以看出, $R^2>0.99$, 且 $sig<0.01$, 说明 Horton 提出的数学模型的拟合度和显著性十分理想. 拟合结果得出的 R_b 值, 也符合 Horton 提出的 R_b 值将在 3~5 范围波动^[10].

3.1.2 河道长度与河道级别分析

按照 Horton 观点, 各级河道长度的平均值与河道数量一样呈现一个几何数列的变化. 因此, 提出了如下公式:

$$L_u = L_1 R_L^{(u-1)},$$

式中: L_u 为 u 级河道的平均长度, L_1 为第一级河道的平均长度, R_L 为河道长度比.

根据表 2, 对 Nu 和 $u-1$ 进行指数曲线回归, 其结果见表 4. 从表 4 可知, 除县江—东江流域方程拟合效果较差外, 剡江、鄞江流域以及整个奉化江流域基本符合 Horton 提出的数学模型, 即各级河道的平均长度和级别呈现几何数列的增长. 而县江—东江流域拟合效果不理想, 其原因是该流域海拔较低, 且河道的下游基本处于平原地区, 加上东江流域较为狭长, 很多一级河道并没有汇合, 直接注入东江的主干河道, 即 3 级河道, 使得县江—东江流域的 3 级河道平均长度远高于 4 级河道.

表 4 Horton 河长律指数模型回归汇总

流域	模型汇总			
	R^2	F	sig	R_L
奉化江	0.984	249.373	0.000	1.987
剡江	0.997	858.391	0.000	2.461
县江—东江	0.908	29.677	0.012	2.107
鄞江	0.994	477.635	0.000	2.394

3.1.3 平均比降与河道级别分析

Horton 发现河道的级别与其比降服从递减的几何数级, 并提出了平均比降定律. Morisawa 据此提出如下模型^[11]:

$$S_u = S_1 R_J^{(u-1)},$$

式中: u 为河道级别, S_u 为第 u 级河道平均比降, S_1 为第 1 级河道平均比降, R_J 为河道平均纵比降比.

指数函数拟合结果见表 5.

表 5 Horton 比降律指数模型拟合

流域	模型汇总			
	R^2	F	Sig	R_J
奉化江	0.929	52.259	0.002	0.192
剡江	0.980	148.711	0.001	0.297
县江—东江	0.932	40.915	0.008	0.179
鄞江	0.997	1138.018	0.000	0.365

从表 5 可以看出, 各个流域的拟合效果均较为理想, 方程的显著性水平均小于 0.01, 说明方程具有统计学意义.

3.2 河道纵剖面形态分析

在提取河道剖面时, 剖面线沿各流域的干流提取. 因流域下游起伏不大, 故仅提取上游和中游的剖面, 结果如图 4 所示. 从图 4 可发现, 各支流均出现多次的阶梯状起伏, 分析其原因有三: (1)受地壳构造运动影响, 抬升幅度有差异. (2)由于河床基岩的岩性不一致, 河流经过不同岩性地区形成不同的坡降. (3)河流遇到暂时的侵蚀基准面^[12].

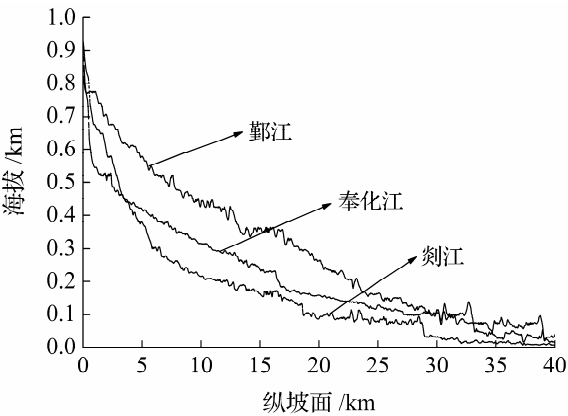


图 4 奉化江三大支流的纵剖面提取结果

据赵洪壮等理论, 在地理环境平缓的地区, 处于不同阶段的河道, 其纵剖面形态也会不同, 且可用函数模型拟合各阶段的纵剖面, 纵剖面线会出现

线性剖面到指数剖面,再到对数剖面,最后到幂函数剖面的演化过程^[13],其实质是河道的下凹度与河道发育时间成正比.对奉化江3个主要支流进行剖面函数拟合,鄞江呈现指数剖面,剡江和县江呈现对数剖面.根据该理论推测,奉化江各支流的发育次序分别为县江、剡江,最后是鄞江.

3.3 基岩性河道水力侵蚀模型分析

水力侵蚀模型又称为S-A模型,其构建思路为:当基岩性河道达到均衡时,河床高程将不会随着时间而改变,用数学公式表达为 $dz/dt=0$.而对基岩性河道在均衡状态下,即基岩的抬升速率等于河流下切速率.河道水力侵蚀模型可表示为^[13-14]:

$$dz/dt = U - E = U - KA^m S^n,$$

式中: U 为基岩抬升速率, E 为河流下切速率, K 为侵蚀系数, A 为河道上游的流域面积, S 为河道坡度, m 和 n 为常数.

当 $dz/dt = 0$ 时,

$$U - KA^m S^n = 0, S = (U/K)^{1/n} A^{-m/n}, \quad (1)$$

令 $\theta = m/n$, $Ks = (U/K)^{1/n}$, (1)式可化为:

$$\lg S = -\theta \lg A + \lg(Ks).$$

可以推测:当河道处于均衡状态时,河道坡度的对数与其上游集水区的对数呈现线性关系.当 $dz/dt > 0$ 时,其河道高程随着时间变化不断的抬升;当 $dz/dt < 0$ 时,河道高程随着时间的变化不断地降低^[14-15].

对奉化江三大支流进行S-A分析,按照河道等级,逐级计算该级别河道的集水面积和坡度,由于各流域基岩性质的河道集中于上游,故选取各流域中一级、二级、三级河道的集水面积及其坡度进行计算,结果如图5所示.

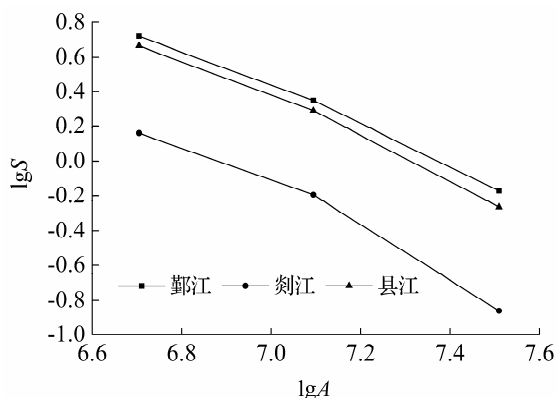


图5 奉化江三大支流S-A模型双对数图

从图5中可看出,三大支流的S-A模型基本呈线性关系,对其进行线性拟合,结果见表6.

表6 奉化江各支流S-A模型线性拟合结果

支流	θ	Ks	R^2
剡江	1.153	3.126E+08	0.997
县江	1.160	9.770E+07	0.996
鄞江	1.156	2.757E+08	0.991

从表6可看出,鄞江、县江、剡江线性拟合程度均大于0.99,说明奉化三大支流的基岩河道已基本处于均衡状态.从图5可发现,三大支流的S-A曲线基本平行,对剡江、县江、鄞江 $\lg A$ 和 $\lg S$ 进行主成份分析,各提取一个主成份,并进行相关分析,其相关系数均大于0.997,其中剡江和鄞江的相关系数高达1.000.故依据S-A模型,3个流域大致可分为2类:剡江、鄞江归为一类,县江为一类.

4 讨论

4.1 R_b 、 R_L 、 R_f 值关系

R_b 、 R_L 、 R_f 是一个流域地貌要素综合作用的结果,是衡量一个流域水系结构的重要尺度.为探究这3个数值之间的关系,将各流域 R_b 、 R_L 、 R_f 值进行汇总(表7),其中奉化江流域的 R_b 、 R_L 、 R_f 从流域地貌学意义上可看成整个流域的平均值,因此各流域的 R_b 、 R_L 、 R_f 偏离奉化江流域的 R_b 、 R_L 、 R_f 的比例可看成这3个值的波动范围.

表7 各流域 R_b 、 R_L 、 R_f 值汇总

流域	R_b	波动/%	R_L	波动/%	R_f	波动/%
奉化江	3.996	0.00	1.987	0.00	0.192	0.00
剡江	3.706	-7.26	2.461	23.86	0.297	54.69
县江—东江	3.817	-4.48	2.107	6.04	0.179	-6.77
鄞江	3.919	-1.93	2.394	20.48	0.365	90.10

4.1.1 不同流域的 R_b 、 R_L 和 R_f 值关系

从表7可看出, R_f 和 R_L 大致呈正比,相关分析表明其相关系数为0.87.对于 R_b ,其变化幅度不大,且与 R_f 、 R_L 不存在明显的相关性.

R_b 值相对与 R_L 、 R_f 值较为稳定,这也印证了Horton、Strahler以及Smith的看法,即不论何种自然条件下,河道的平均分叉比值都是相似的,其变化范围在3~5之间^[10].因此可以认为, R_b 可以看成

独立于地貌因素之外的特殊常数值,虽会出现波动,但其波动范围较小,其性质类似与重力常数 g 。至于导致 R_b 值波动的原因,目前对此研究并不多见,有学者认为这种波动是统计误差造成,也有学者认为与流域地势比和流域剖面发育阶段有关,但没有系统的定量论证^[1]。

R_f 值的波动范围较大,这与流域所处的岩性、构造有关。研究区内地质构造特别是断裂构造复杂,有EW、NE、NW、NNE 4个方向的断层,且岩性并不均一,主要有侏罗系火山岩类、白垩系砂页岩、砂砾岩等,而前者的抗侵蚀能力较强^[11],于是导致各支流流域 R_f 值的波动范围较大。

R_f 和 R_L 呈正相关关系,可细化河道比降与河道平均长度之间关系。Morisawa发现:在同一个流域中,水道比降和平均长度呈现负相关^[10]。从表2可看出,不同流域间河道平均长度随比降变化明显不同。由于 R_f 和 R_L 呈正相关,由此可推出在 R_f 值较大的区域,河道平均长度随比降变化的程度越强。在流域地貌学上的意义是各级河道比降变化剧烈的流域,其河道长度变化也越剧烈。

4.1.2 同一流域 R_b 、 R_L 和 R_f 值的关系

从表7可看出,不论是奉化江整个流域,还是各个支流流域,其 R_b 、 R_L 、 R_f 值呈高度的线性关系。对三大支流的 R_b 、 R_L 、 R_f 值进行相关分析,其相关系数均大于0.99。

同一个流域内 R_b 、 R_L 、 R_f 呈高度的线性关系,可反映出该流域内这3个值之间存在某种联系,虽然是从不同的角度去度量一个流域的计量特征,而这3个值是从河道数量、河道平均长度、河道比降3个角度作为一个流域的度量尺度,这三者之间显然存在某种关联,因此这3个值也有一定的关联性。但是需要指出的是,这3个值的相关性体现的是各级河道数量、河道平均长度、河道比降的变化量的相关性,不是简单的数量相关性。

4.2 R_b 、 R_L 和 R_f 值与河流纵剖面的关系

从表7可看出,剡江和鄞江的 R_b 、 R_L 和 R_f 值比较接近,若以 R_b 、 R_L 和 R_f 值为依据,进行聚类分析可得出,剡江和鄞江可以归为一类,县江单独为一类。这与S-A模型分析的结果类似,可以推断剡江和鄞江之间的联系是十分密切的。

剡江和鄞江流域主体处于宁奉平原西侧的四

明山区,这意味着2个流域发育的地质环境和气候条件接近,因此,无论 R_b 、 R_L 和 R_f 值还S-A模型的双对数值,都是与各项流域环境因素有关。这也体现了 R_b 、 R_L 和 R_f 值与S-A模型存在一定的联系性,可以推测这两种定量测算方法,可以说是对同一流域的某些特性的不同角度的阐述。

5 结论

(1) 通过Burn-in算法,提取了奉化江干流及其支流的数字河网以及流域面积、长度、平均宽度等流域几何特征。从河网、流域的提取结果基本上都符合现状。

(2) 利用提取的流域计量特征,验证了Horton的三大定律基本适用于奉化江流域。同时讨论了 R_b 、 R_L 、 R_f 之间的关系,得出:(a) R_b 值相对与 R_L 、 R_f 值较为稳定;(b) R_L 和 R_f 值存在较强的正相关性,河道比降变化剧烈的流域,其河道长度变化也越剧烈,反之亦然;(c)在同一流域内, R_b 、 R_L 、 R_f 存在明显的线性关系,说明三者存在一定的关联;(d)相邻流域或者子流域间这3个值存在十分强烈的相关性。

(3) 剖面线函数拟合发现,鄞江呈现出指数剖面,剡江和县江呈现的是对数剖面,根据前人的理论,推测三大支流发育的顺序为剡江、县江,最后是鄞江。

(4) 三大支流基岩性河床的S-A模型分析发现,三大支流为基岩性河段,且均处于均衡状态;剡江和鄞江的S-A曲线存在强烈的相关性,可归为一类。这与 R_b 、 R_L 、 R_f 值分析结果相一致,也验证了Waldo Tobler提出的“地理事物或属性在空间分布上互为相关,且相近的事物关联更紧密”的观点。

致谢 感谢李加林教授提供的资料及悉心指导。

参考文献:

- [1] 杨晓平. 奉化江流域地貌形态计量分析[J]. 宁波师范学院学报, 1992, 10(6):59-65.
- [2] 李小曼, 王刚, 田杰. TM影像中水体提取方法研究[J]. 西南农业大学学报, 2006, 28(4):580-582.
- [3] 孙艳玲, 刘洪斌, 谢德体, 等. 基于DEM流域河网水系的提取研究[J]. 资源调查与环境, 2004, 25(1):18-22.
- [4] 《宁波市水利志》编纂委员会. 宁波市水利志[M]. 北

- 京: 中华书局, 2006:62-67.
- [5] 浙江地矿局. 浙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989:534.
- [6] 陆景冈, 唐根年, 李健. 浙江省的新构造运动与农用地分布规律[J]. 浙江地质, 1999,15(2):24-30.
- [7] 李德熊. TM 合成图像波段组合的选择[J]. 遥感信息, 1989(4):19-22.
- [8] 王建平. 数字流域与数字水文模型的集成研究[D]. 南京: 河海大学, 2005:18-19.
- [9] 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.
- [10] 承继成, 江美球. 流域地貌数学模型[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [11] 杨晓平. 基于 TM 遥感图像的流域地貌研究[J]. 科技通报, 2003, 19(2):150-153.
- [12] 钱宁. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987:55-66, 345.
- [13] 赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 天山北麓河流纵剖面与基岩侵蚀模型特征分析[J]. 地理学报, 2009, 64(5): 563-570.
- [14] 陈彦杰, 宋国城, 陈昭男. 非均衡山脉的河流水力侵蚀模型[J]. 科学通报, 2006, 51(7):865-869.
- [15] 张会平, 张培震, 吴庆龙, 等. 循化—贵德地区黄河水系河流纵剖面形态特征及其构造意义[J]. 第四纪研究, 2008, 28(2):299-309.

ETM+ and DEM Based Geomorphic Extraction and Quantitative Analysis of Fenghua River Basin

CHEN Peng-cheng, YANG Xiao-ping*, YUAN Qi-xiang, LIANG Xian-jun

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In this research, the ETM+ remote sensing technology and DEM spatial analysis technology are used to analyze the Fenghua River Basin river structure, and extract the geomorphic parameters. The SPSS software is used to analyze the watershed topography. The results show that: (1) The basin length and area extracted using the ETM+ and DEM data are consistent with the ground truth data; (2) There is a certain correlation between river bifurcation ratio, channel length ratio, and the longitudinal gradient ratio; (3) Based on the curve-fitting function, the growth sequence of three major tributaries is found to be Shan Jiang, Xin Jiang, and Yin Jiang; (4) Using the S-A model, it is found that the bedrocks of the three tributaries of Fenghua River are in the equilibrium state.

Key words: Fenghua river; river basin; quantitative analysis

(责任编辑 史小丽)