

河流断面演变关键影响因子遥感统计分析与识别^{*}明安远¹⁾ 谢富明³⁾ 赵长森^{1,2)}† 杨胜天^{1,2)} 张纯斌²⁾ 潘天力²⁾(1)北京师范大学水科学研究院, 100875, 北京; (2)北京师范大学地理科学学部, 遥感科学国家重点实验室, 100875, 北京;
(3)新疆玛纳斯河流域管理局, 832000, 新疆石河子)

摘要 选取人类活动影响较小的三江源地区, 利用多源遥感数据, 结合最小二乘法与模糊聚类法开展大数据统计分析, 探索自然因素对河流断面形状空间变异的影响。结果表明: 在所有影响因素中, 流域面积是驱动河流断面形状变化最主要的影响因素, 随着断面控制流域面积的增加, 上游“窄-深”型河道渐变为下游“宽-浅”型河道; 土壤孔隙高、粉粒含量大、断面位置坡度高、植被盖度低的地理环境更利于抛物线型河流断面的形成; 断面形状拟合参数(a)、控制流域面积(S)与宽深比(R_{WD})的关系函数均为指数型函数($a = c_1 e^{d_1 S}$, $R_{WD} = c_2 e^{d_2 S}$)。以上结论适用于受人类活动影响小、资料缺乏的山区自然河道, 可准确、高效、安全地获取河流断面形状, 为河流水质评价、生态流量计算、河流健康保护、水土保持措施配置研究等奠定坚实的方法和数据基础, 助力我国生态文明重大方略的实施。

关键词 自然河流; 多源遥感; 断面变化; 影响因子; 三江源地区

中图分类号 P332.3

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020404

0 引言

全球河流生态环境受到政府及科研工作者的广泛关注。河流断面形状作为评价河道生态环境状况的重要参数之一, 可反映河道地形特征时空变化, 影响河流流速和河道流量, 既是河流研究中的关键水力因子, 也是水动力模型模拟的重要基础数据之一; 同时还是河流流量计算^[1-4]、环境流量评估^[5-6]、栖息地保护和水资源管理^[7-9]的关键基础数据。传统方法主要通过利用水准仪、全站仪及差分GPS实地测量获取^[10-12], 不仅耗时、耗力, 成本高、效率低, 而且测量过程风险高, 常危及测量人员的生命安全^[13-14]。随着遥感卫星技术的快速发展, 越来越多的遥感卫星被用于河流参数信息的提取^[15-16]、地形三维模型的构建、土壤位移的监测^[17-18]、土壤侵蚀过程的研究^[19]、极地冰川季节性融化过程的探索^[20]等。遥感技术已成为现代社会主要的对地观测方式, 其快速、无接触测量的特点可有效弥补传统测量方式的不足, 提高测量效率, 保障人员安全。

在利用遥感技术进行河流断面反演时, 需要通过遥感影像确定影响河流断面形成的主要环境因素。流域面积是影响河流的主要环境因素之一^[21-22], 宽深

比是指河流最大水面宽与最大水深的比值, 是常用的描述河流断面形状的指示因子; 地形坡度^[23-24]、土壤类型^[25-26]以及叶面积指数^[27-28]对河流的形成均有不同程度的影响。目前研究中, 针对以上因素对河流断面形状影响的定量研究还不足, 导致缺资料河流断面难以定量反演, 急需定量探索河流断面形状对流域面积、宽深比等因素的响应规律, 以便快速、有效地反演缺资料河流的过水断面。

本研究基于上述环境因子, 利用多源遥感数据定量计算环境因子数值, 基于山区河流形状的特性, 建立河流断面形状参数, 重构环境因子与河流断面参数的回归关系, 探索影响断面形状的主要环境因素——流域面积与河流断面形状参数的关系, 以及河流断面形状的指示因子——宽深比与河流断面形状参数的关系; 同时考虑河流断面位置的地形坡度、土壤类型及叶面积指数对断面形状的影响。这种关系可适用于受人类活动影响小的山区自然河道, 对及时、准确、快速获取河流断面形状, 为河流水质评价、生态流量计算、河流健康保护、地貌特征分析、水土保持措施配置等行业方向奠定坚实的数据基础, 助力我国生态文明重大方略的实施, 具有重要的现实及社会意义。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(U1812401)

† 通信作者: 赵长森(1977—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 遥感水文。E-mail: zhaochangsen@bnu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-07

1 研究区和数据

1.1 研究区 三江源头是国家重要的保护源区, 该区域的生态环境的状况直接影响到长江、黄河和澜沧江流域的环境质量^[29]. 源区河道地形是水文模型及计算生态需水的重要参数, 是评价生态健康程度的重要

指标. 因此, 为了保护区域生态环境, 迫切地开展河流断面变化的研究.

三江源(长江、黄河和澜沧江)源头, 位于 $89^{\circ}38'56''\sim 102^{\circ}7'32''E$, $31^{\circ}53'16''\sim 35^{\circ}54'9''N$, 海拔约 2564~6571 m, 地形起伏较大, 人类活动对自然河道的影响相对较小, 是探索自然河道的发育过程与形成规律的典型区域(图 1).

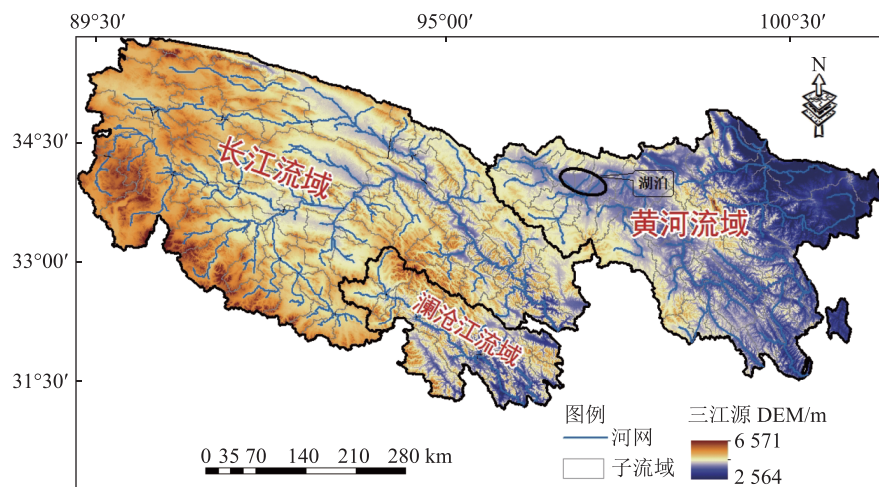


图 1 三江源研究区

1.2 数据 研究中用到的基础遥感数据主要包括 ASTER GDEM 数据 (<http://www.gscloud.cn/>), 资源 3 号卫星数据 (ZY-3) 和 MODIS 数据 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>). ASTER GDEM 数据产品基于“先进星载热发射和反辐射计 (ASTER)”数据计算生成, 是目前唯一覆盖全球陆地表面的高分辨率高程影像数据, 其空间分辨率为 30 m, 已被证明可用于提取大型水库及河流地形信息提取^[30]. 资源 3 号卫星是中国第一颗自主研发的民用高分辨率立体测绘卫星, 通过立体观测, 可以测制 1:5 万比例尺地形图, 制作所得 DEM 空间分辨率为 5 m. MODIS 是搭载在 Terra 和 Aqua 这 2 颗卫星上的、能够长时间收集全球陆地表面 LAI 的变化信息的传感器. 考虑到春季研究区内植被生长差异较为显著, 更适合探讨研究区内不同植被覆盖度造成的影响, 本文参考选用了 2017 年 5 月 1 日的 MCD15A2H 产品 (轨道号分别为 h24v0 5、h25v05、h26v05), 其空间分辨率为 500 m.

本研究断面形状信息的获取是基于 ArcGIS 中 3D Analyst 模块, 综合使用 ASTER GDEM 数据与资源 3 号所得 DEM. 考虑到汛期水位较高会造成 DEM 提取水下断面的误差^[31-32], 本文选用春季与冬季的非汛期数据. 选择研究区内重要控制断面提取断面信息, 包括起点距与高程信息. 坡度数据的获取方式与断

面形状信息的获取方式相同, 叶面积指数 (LAI) 均来自 MODIS 产品, 土壤类型基于中国科学院南京土壤研究所与农业农村部土壤环境处合作制作的全国 1:100 万数字化土壤图数据提取, 子流域和河网通过 ArcSWAT 生成 (<http://swat.tamu.edu/>), 流域面积由 ArcGIS10.4 计算生成.

2 方法

2.1 空间河流断面位置选取方法 研究选取了 38 个断面(图 1), 选取断面位置遵守以下 3 个原则: 1) 选取流域或子流域的出口处; 2) 基本没有人类活动影响; 3) 上游没有水库或湖泊干扰. 在黄河流域上游有湖泊影响, 所以黄河流域内没有选取河流断面, 以防止影响自然河道发育规律的探索.

2.2 断面拟合 河流断面的拟合, 主要包括河道地形数据的获取、断面形状的拟合及拟合参数的确定. 具体方法如下: 1) 在遥感 30 m DEM 数据基础上, 选择断面位置利用 ArcGIS10.4 中 3D Analyst 空间统计方法, 获取河流断面形状; 2) 考虑到山区河道由于受人类活动影响较小, 其自然形态基本属于“抛物线”型^[33-35], 所以假定函数为 $y = ax^{2[35]}$, 其中 x 代表从断面左岸为起点的起点距, y 代表以断面高程最低点为基准点的相对高程, a 为拟合参数. 按断面位置分别为: $y_1 = a_1x_1^2$, $y_2 = a_2x_2^2$, ..., $y_n = a_nx_n^2$; 3) 通过 1stOpt 软件的通

用全局优化算法(Universal Global Optimization, UGO), 确定 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 参数值. 研究区内长江、澜沧江、黄

河流域典型断面如图 2 黑实线所示, 用 $y = ax^2$ 所得的拟合断面如图 2 灰色虚线所示.

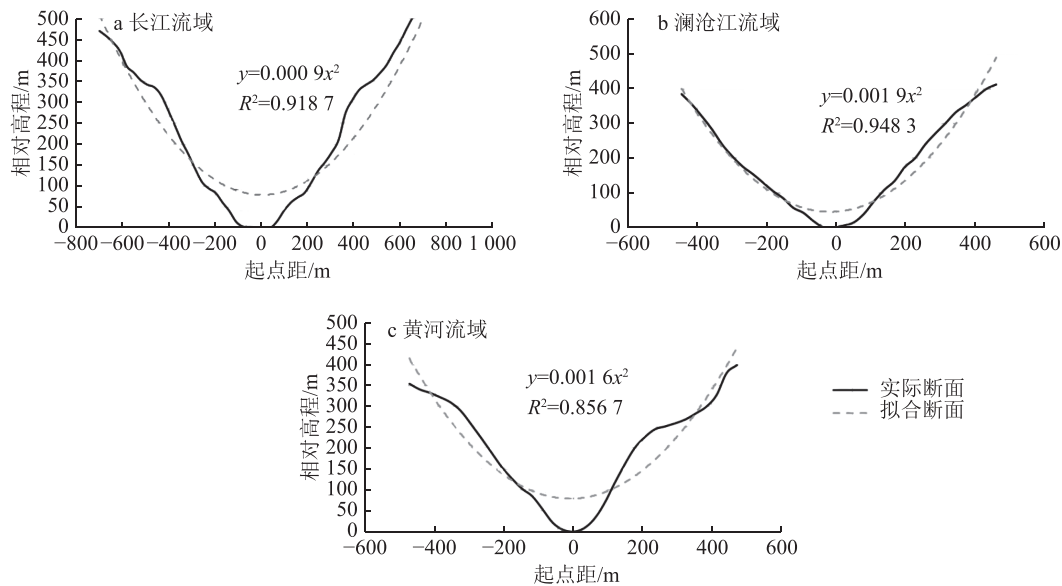


图 2 三大流域典型实际断面与对应的拟合断面

2.3 基于模糊聚类的断面分类 模糊聚类分析是一种采用模糊数学语言对事物按一定的要求进行描述和分类的数学方法^[36-37]. 模糊聚类分析一般是指根据研究对象本身的属性来构造模糊矩阵, 并在此基础上根据一定的隶属度来确定聚类关系, 即用模糊数学的方法把样本之间的模糊关系定量地确定, 从而客观且准确地进行聚类^[38-39]. 通过聚类将数据集分成多个类或簇, 使得各个类之间的数据差别应尽可能大, 类内之间的数据差别应尽可能小, 遵循“最小化类间相似性, 最大化类内相似性”的原则^[40-41]. 本研究区由于范围较大, 选择的河流断面有着不同的地理条件, 如河道的土壤类型、坡度、植被覆盖度等. 利用模糊聚类可对研究区内的河道进行合理分类, 更细致且准确地探讨不同地理条件下的河流断面受外界控制因子的影响.

2.4 规律统计(函数的确定)方法 研究的最终目的, 是确定河流断面拟合函数($y = ax^2$)中 a 与关键影响要素流域面积 S 和宽深比 R_{WD} 的定量函数来评价流域面积对河流断面形状的影响, 并验证 a 作为河流断面形状的可靠性. 首先, 统计每个断面控制的 S 和 R_{WD} , 分别为 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 以及 $R_{WD1}, R_{WD2}, \dots, R_{WDn}$; 其次得到 n 组 a 与 S 的数据 $(a_1, S_1), (a_2, S_2), \dots, (a_n, S_n)$, n 组 a 与 R_{WD} 的数据 $(a_1, R_{WD1}), (a_2, R_{WD2}), \dots, (a_n, R_{WDn})$, 最后利用最小二乘法分别确定出 a_i 和 S_i , a_i 和 R_{WDi} 的函数关系.

3 结果

3.1 断面模糊聚类结果 研究根据河流断面位置的坡度、土壤类型和 LAI 这 3 种属性进行模糊聚类, 最终分为 3 大类(图 3). 其中, 同一支流下的断面点, 基本被分为同一类. 聚类 1 中断面位置有较大的坡度和 LAI, 土壤类型基本为草毡土; 聚类 2 坡度最小, LAI 较大, 土壤类型大部分为寒钙土; 聚类 3 坡度最大, LAI 最小, 土壤类型大部分为沼泽土, 空间分布如图 4 所示.

3.2 断面的拟合参数与流域面积及宽深比的规律统计分析 利用所有的断面数据进行分析, 得到断面 a 与 S 、 R_{WD} 与 S 、 a 与 R_{WD} 之间的关系. a 越大, 抛物线开口越小, R_{WD} 越小, 河道形状开口越窄, 代表“窄-深”型河道; a 越小, 抛物线开口越大, R_{WD} 越大, 河道形状开口越宽, 代表“宽-浅”型河道.

图 5 是 a 与 S 的关系, 属于“指数”型函数, 函数为 $y = 0.0016e^{-0.0001x}$, 相关系数 $R^2 = 0.58$. 表现的特征是: 随着断面控制流域面积的增加, 断面 a 的值逐渐变小, 河流断面形状开口由小变大.

图 6 是 a 与 R_{WD} 的关系, 是“指数”型函数, 函数为 $y = 0.0028e^{-0.094x}$, 相关系数 $R^2 = 0.75$. 代表特征为: 随着 R_{WD} 的增加, 断面 a 的值逐渐变小, 河流断面形状开口由小变大.

综上所述, 随着自上而下流域面积的增加, 流量越来越大, 坡度逐渐降低, 下切冲刷能力减小, 导致河

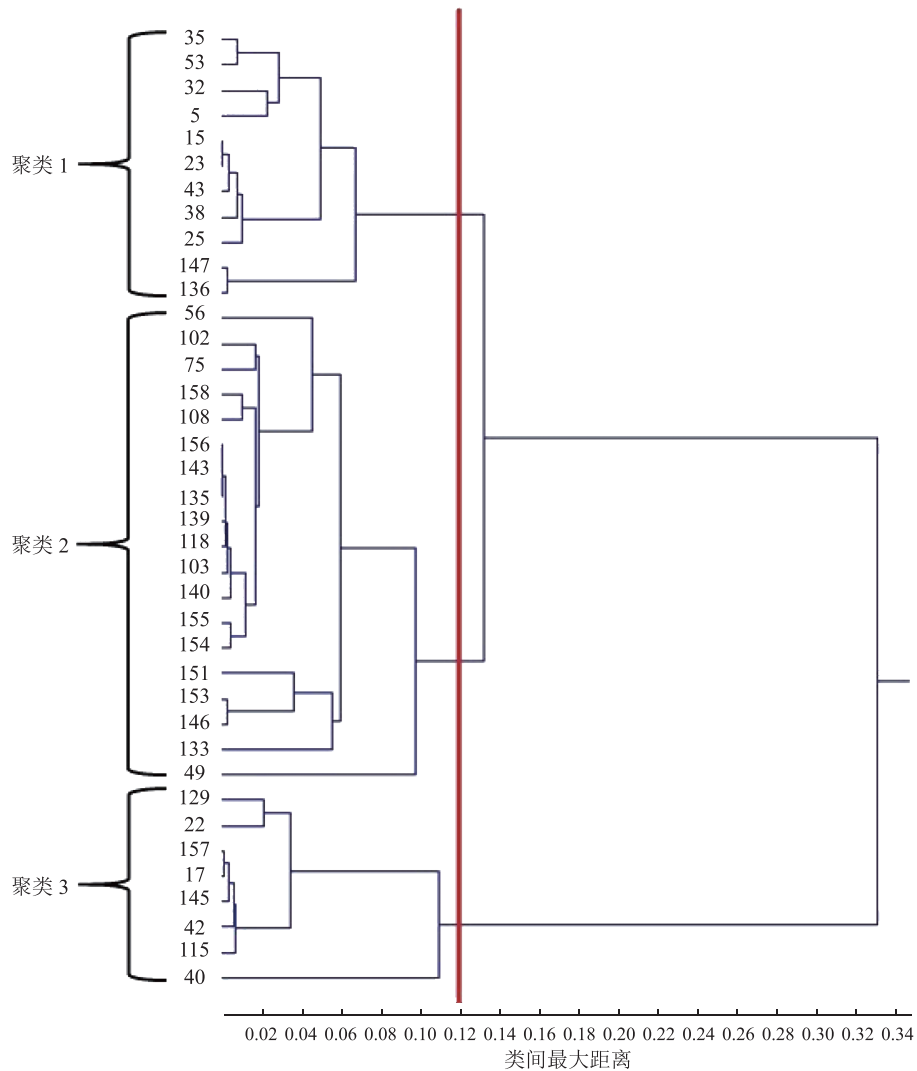


图3 断面模糊聚类结果

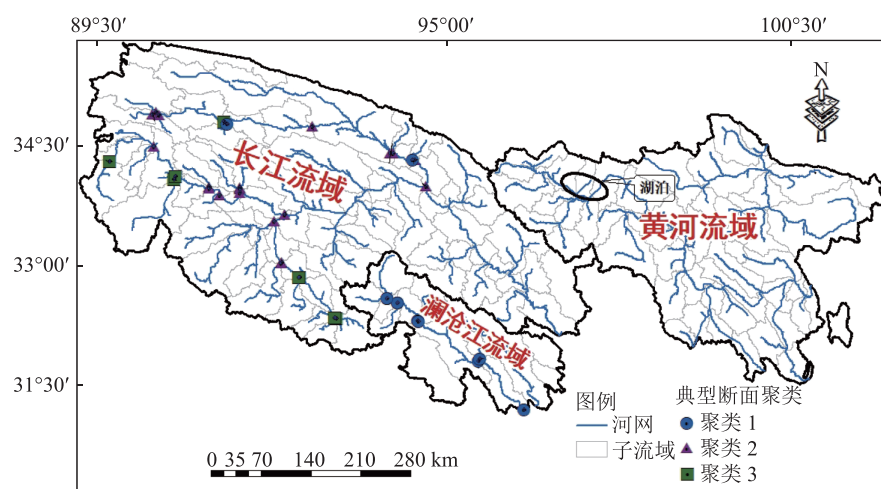


图4 典型河流断面分布及模糊聚类结果

道断面宽深比增加,断面 a 的值逐渐变小,河道形状开口逐渐变大,上游“窄-深”型河道渐变为下游“宽-浅”型河道。

3.3 断面模糊聚类分析 通过模糊聚类的方法,将所

有断面点分成聚类1、2和3(图3、4)3类。根据聚类结果,分类拟合研究区内断面的拟合参数对流域面积、宽深比的响应规律,并建立了河流断面 a 、 R_{WD} 和 S 之间的函数关系,如图7所示。

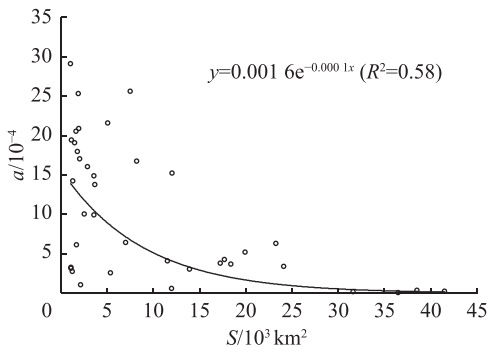


图 5 拟合参数与流域面积的拟合关系

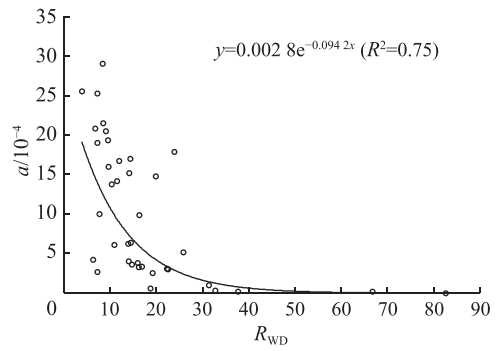


图 6 拟合参数与宽深比的拟合关系

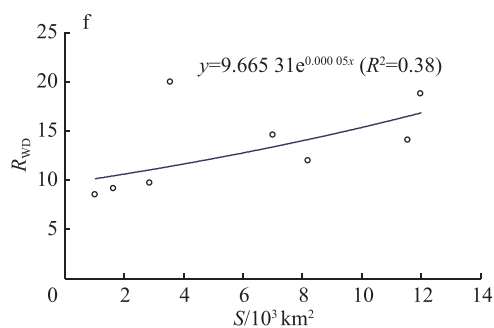
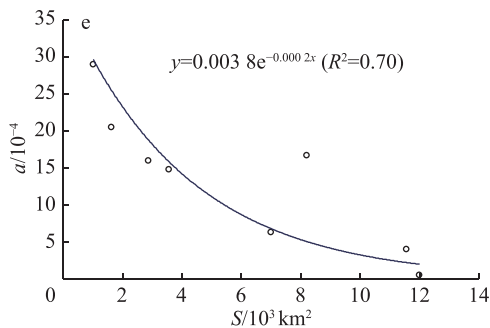
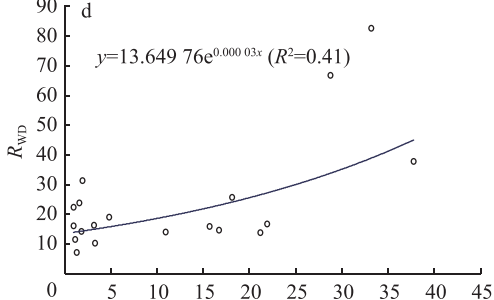
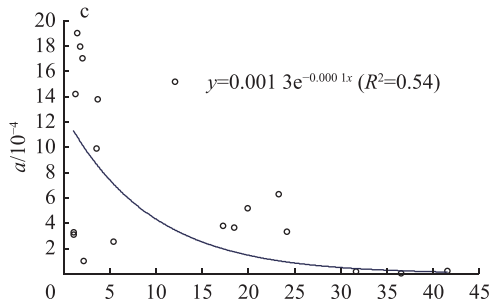
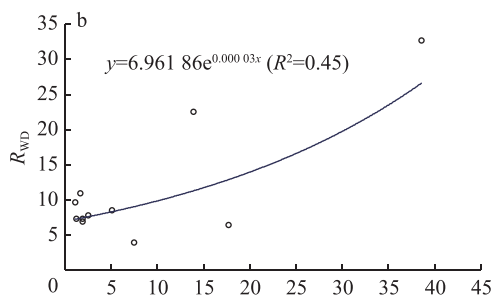
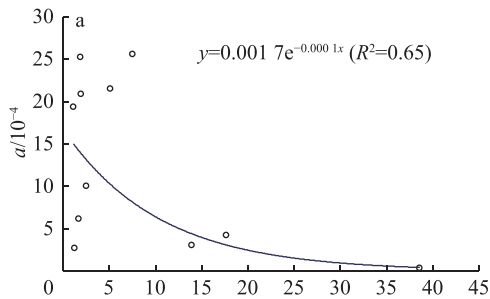


图 7 各河流断面类别的拟合参数、宽深比和流域面积之间的关系

图 7-a、b 是聚类 1 结果: a 与 S 的函数关系为 $a = 0.0017e^{-0.0001S}$, 相关系数 $R^2 = 0.65$; R_{WD} 与 S 之间的函数关系为 $R_{WD} = 6.96186e^{0.00003S}$, 相关系数 $R^2 = 0.45$ 。图 7-c、d 是聚类 2 结果: a 与 S 的函数关系为 $a = 0.0013e^{-0.0001S}$, 相关系数 $R^2 = 0.54$; R_{WD} 与 S 之间的函数关系为 $R_{WD} = 13.64976e^{0.00003S}$, 相关系数 $R^2 = 0.41$ 。图 7-e、f 是聚类 3 结果: a 与 S 的函数关系为 $a = 0.0038e^{-0.0002S}$, 相关系数 $R^2 = 0.70$; R_{WD} 与 S 之间的函数关系为 $R_{WD} = 9.66531e^{0.00005S}$, 相关系数 $R^2 = 0.38$ 。3 类聚类表明, 河流断面 a 对 R_{WD} 和 S 的响应函数均为“指数”型。

4 讨论

4.1 土壤类型、坡度、LAI 对拟合参数与流域面积关系的影响 图 8 是按照土壤类型将断面点分为 3 类, 分别为沼泽土、草毡土和寒钙土。在沼泽土主导的流域内, 随着流域面积的增加, 拟合参数即断面形状开口指数 a 迅速减小, 河流断面形状由“窄深”型迅速转变成“宽浅”型, 这说明沼泽土有利于水流对断面形状的塑造。进一步分析发现, 研究区内沼泽土孔隙比可高达 3~15, 粉粒含量高于黏粒含量, 导致其渗

透性小, 抗水流冲刷耐受能力弱^[42], 随着河流自上游至下游的流量增加, 从而产生上下游断面形状改变较为明显的现象. 相反, 寒钙土孔隙比低, 粉粒含量低于黏粒含量, 导致其对水流冲刷耐受能力强^[43], 从而造成在非常大的流域面积变化范围内(较长的河段内), 水流对断面形状的塑造能力较弱. 通过对各类土壤主导流域断面形状开口指数与流域面积的相关性分析也发现, 沼泽土和草毡土 R^2 能达到 0.7, 大于寒钙土. 这说明不同的土壤类型对河流断面的形成影响不同^[44], 相比研究区内的寒钙土, 沼泽土和草毡土中的中值粒径和黏粒含量更低, 导致土壤分离能力较强^[45], 经河流不断地冲刷, 使得河流断面形状更倾向于抛物线型^[46-47].

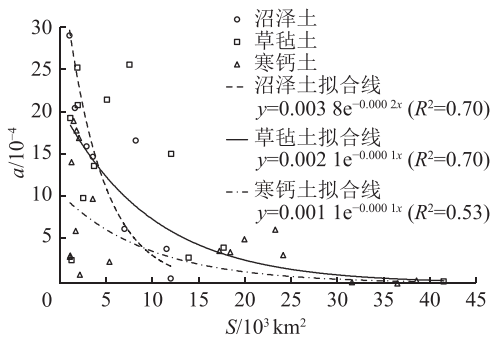


图 8 土壤类型对拟合参数与流域面积关系的影响

图 9 是按照坡度将断面点分为 3 类, 分别为低坡度 ($0\sim6^\circ$)、中坡度 ($7\sim9^\circ$) 和高坡度 ($10\sim38^\circ$). 通过研究相关性发现, 在断面位置坡度较低情况下, 拟合函数的相关性很低, 不利于自然抛物线河道的形成^[48]. 地形坡度在中坡度 ($7\sim9^\circ$) 和高坡度 ($10\sim38^\circ$) 时, 更利于自然抛物线河道形成.

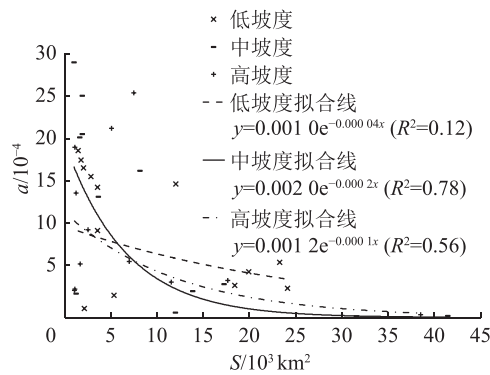


图 9 坡度对拟合参数与流域面积关系的影响

图 10 利用 ArcGIS 软件中的分位数分级法, 按照 LAI 数值大小将断面点 LAI 归为低、中、高 3 类. 既保证 LAI 的分组不存在空类, 也不存在值过多或过少的类. 低 LAI 植被对地面的保护作用弱, 水流对地面改变作用受限制较小, 对河流形态塑造作用强, 断面

形状开口指数随流域面积迅速降低, 即很快由上游的“窄深”型变为“宽浅”型河道. 但当流域面积增大到一定程度(比如, $>10000\text{ km}^2$, 尤其是 $>30000\text{ km}^2$), 断面形状随流域面积变化缓慢; 高 LAI 情况下, 河流断面形状参数与控制流域面积没有很强的相关性, 随流域面积增大, 断面开口指数呈减少趋势, 但趋势不明显. 相关分析发现, 拟合函数的相关性随着 LAI 增大逐渐降低, 这说明植被盖度越低越利于抛物线河道的形成^[49-50].

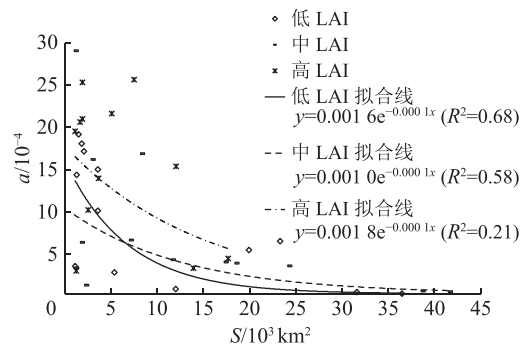


图 10 LAI 对拟合参数与流域面积关系的影响

4.2 土壤类型、坡度、LAI 对拟合参数的影响 相比寒钙土, 沼泽土和草毡土的土壤类型更易形成“窄-深”型河道, 而坡度对河道形成的影响能力较小, 高 LAI 更易形成“窄-深”型河道, 如表 1 所示.

表 1 土壤类型、坡度、LAI 分类下拟合参数的均值

土壤类型	$\bar{a}/10^{-6}$	坡度	$\bar{a}/10^{-6}$	LAI	$\bar{a}/10^{-6}$
沼泽土	1352	低	1015	低	853
草毡土	1348	中	1051	中	721
寒钙土	649	高	985	高	1517

4.3 土壤类型、坡度、LAI 对拟合参数与宽深比关系的影响 按照土壤类型将断面点分为 3 类(图 11), 分别为沼泽土、草毡土和寒钙土. 通过曲线斜率分析发现, 沼泽土和草毡土土壤环境下, a 随着 R_{WD} 增加, 变化陡峭, 寒钙土变化较缓.

接着按照坡度将断面点分为 3 类(图 12): 低坡度 ($0\sim6^\circ$)、中坡度 ($7\sim9^\circ$) 和高坡度 ($10\sim38^\circ$). 曲线斜率分析表明, 在低坡度和高坡度环境条件下, a 随着 R_{WD} 增加, 变化陡峭, 中坡度下变化较缓.

进一步按照 LAI 将断面点分为 3 类(图 13), 分别为低 LAI、中 LAI 和高 LAI. 曲线斜率表明: 在中 LAI 和高 LAI 条件下, a 随着 R_{WD} 增加, 变化陡峭, 低 LAI 下变化较缓.

综上所述, 所有影响因素中, 流域面积是驱动河流断面形状变化最主要的影响因素, 而坡度、土壤类

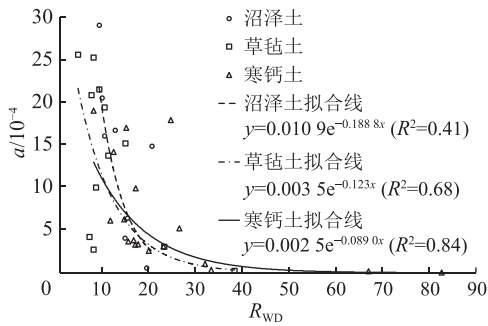


图 11 土壤类型对拟合参数与宽深比关系的影响

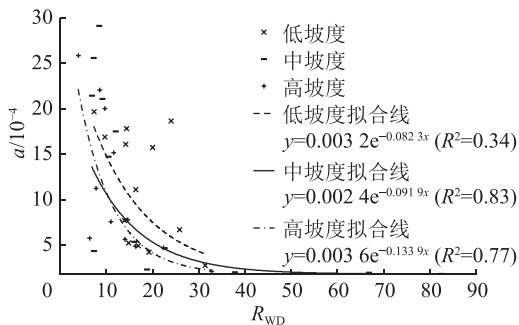


图 12 坡度对拟合参数与宽深比关系的影响

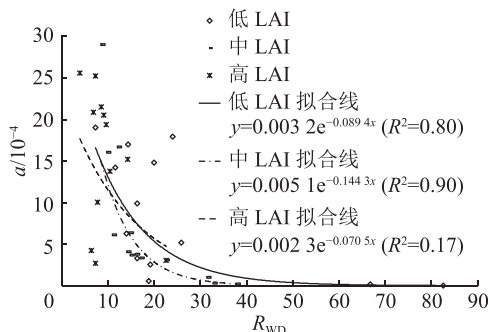


图 13 LAI 对拟合参数与宽深比关系的影响

型和 LAI 会影响断面的形成,但作用小于流域面积^[51-53]。针对流域面积对河流断面形状变化的影响,统计分析表明:随着断面控制流域面积的增加,上游“窄-深”型河道指数形式渐变为下游“宽-浅”型河道;而针对坡度、土壤类型和 LAI 对河流断面的影响,土壤孔隙高、粉粒含量大、断面位置坡度高、植被盖度低的地理环境更利于抛物线型河流断面的形成。

5 结论

本文选取受人类活动影响较小的三江源作为研究地区,利用最小二乘及模糊聚类法,探索自然河流断面形状对流域面积的响应关系,同时考虑了地形、土壤类型及植被对断面形状的影响,主要结论如下:

1) 模糊聚类分析表明研究区可分为 3 大类:第 1 类土壤类型以草毡土为主,具有较大的坡度和 LAI;

第 2 类以寒钙土为主,具有最小的坡度,较大的 LAI;第 3 类以沼泽土为主,具有最大的坡度和最小的 LAI。

2) a 、 S 与 R_{WD} 的关系函数均为指数型函数 ($a = c_1 e^{d_1 S}$, $R_{WD} = c_2 e^{d_2 S}$)。 a 与 S 关系中,第 3 类相关性最强 ($R^2 = 0.70$),最低的是第 2 类 ($R^2 = 0.54$); a 与 R_{WD} 的关系中,第 2 类相关性最强 ($R^2 = 0.45$),最低的是第 3 类 ($R^2 = 0.38$)。

3) 在所有影响因素中, S 是驱动河流断面形状变化最主要的影响因素,而坡度、土壤类型和 LAI 会影响断面的形成但作用小于 S ^[51-53],随着断面控制 S 的增加,上游“窄-深”型河道指数形式渐变为下游“宽-浅”型河道;土壤孔隙高、粉粒含量大、断面位置坡度高、植被盖度低的地理环境更利于抛物线型河流断面的形成。

综上所述,本文探索出的规律关系适用于受人类活动影响小的山区自然河道,对及时、准确、快速获取河流断面形状,评价生态环境状况以及辅助生态环境保护决策有重要的意义。

本文从大尺度角度出发,探索了河流断面形成的主要因素,得出了适用于自然河流的初步结论,但在“窄-深”、“宽-浅”型河道区分时主要依赖于定性评判,未来尚需开展定量化的研究;由于自然界河流断面受人类活动影响复杂,本文仅针对断面形状接近于抛物线型的山区河道,尚未考虑非抛物线断面的河流,比如位于地形变化较大的山区、地形平缓的平原区,以及区别于本文其他区域的河流,未来仍需围绕这些河流断面特性进一步开展研究。

6 参考文献

- [1] GLEASON C J, SMITH L C. Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry[J]. PNAS, 2014, 111(13): 4788
- [2] GORE J A, BANNING J. Discharge measurements and streamflow analysis[M]//Methods in Stream Ecology, Volume 1. Amsterdam: Elsevier, 2017: 49-70
- [3] 李凌云,黎礼刚,王家生. 三峡库区古夫河兴山县县城段生境修复研究[J]. 人民长江, 2015, 46(3): 77
- [4] 孔维静,张远,王一涵,等. 基于空间数据的太子河河流生境分类[J]. 环境科学研究, 2013, 26(5): 487
- [5] WYŻGA B, ZAWIEJSKA J, RADECKI-PAWLIK A. Impact of channel incision on the hydraulics of flood flows: examples from Polish Carpathian Rivers[J]. Geomorphology, 2016, 272: 10
- [6] ZHENG X, TARBOTON D G, MAIDMENT D R, et al. River channel geometry and rating curve estimation using height above the nearest drainage[J]. Journal of the

- American Water Resources Association, 2018, 54(4): 785
- [7] SHAMIR E, MEGDAL S B, CARRILLO C, et al. Climate change and water resources management in the Upper Santa Cruz River, Arizona[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 521: 18
- [8] WEN X, FANG G H, GUO Y X, et al. Adapting the operation of cascaded reservoirs on Yuan River for fish habitat conservation[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 337: 221
- [9] SMITH A, SMOKOROWSKI K E, POWER M. Spawning lake sturgeon (*Acipenser fulvescens* Rafinesque, 1817) and their habitat characteristics in Rainy River, Ontario and Minnesota[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2017, 33(3): 328
- [10] FARINA G, ALVISI S, FRANCHINI M, et al. Three methods for estimating the entropy parameter M based on a decreasing number of velocity measurements in a river cross-section[J]. *Entropy*, 2014, 16(5): 2512
- [11] ARMIJOS E, CRAVE A, ESPINOZA R, et al. Measuring and modeling vertical gradients in suspended sediments in the Solimões/Amazon River[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(3): 654
- [12] MORELLI S, BATTISTINI A, SEGONI S, et al. A cost effective methodology for the rapid evaluation of the flood susceptibility along anthropized rivers[C]//*Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5*, 2015: 849–852
- [13] WATTS A C, AMBROSIA V G, HINKLEY E A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(6): 1671
- [14] 陈仲新, 任建强, 唐华俊, 等. 农业遥感研究应用进展与展望[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 748
- [15] ZHAO C S, PAN T L, XIA J, et al. Streamflow calculation for medium-to-small rivers in data scarce inland areas[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133571
- [16] 赵长森, 潘旭, 杨胜天, 等. 低空遥感无人机影像反演河道流量[J]. *地理学报*, 2019, 74(7): 1392
- [17] PIERZCHAŁA M, TALBOT B, ASTRUP R. Estimating soil displacement from timber extraction trails in steep terrain: application of an unmanned aircraft for 3D modelling[J]. *Forests*, 2014, 5(6): 1212
- [18] CLAPUYT F, VANACKER V, VAN OOST K. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms[J]. *Geomorphology*, 2016, 260: 4
- [19] NEUGIRG F, STARK M, KAISER A, et al. Erosion processes in calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial LiDAR and UAV surveys[J]. *Geomorphology*, 2016, 269: 8
- [20] KRAAIJENBRINK P, MEIJER S W, SHEA J M, et al. Seasonal surface velocities of a Himalayan Glacier derived by automated correlation of unmanned aerial vehicle imagery[J]. *Annals of Glaciology*, 2016, 57(71): 103
- [21] YAMAZAKI D, O'LOUGHLIN F, TRIGG M A, et al. Development of the global width database for large rivers[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(4): 3467
- [22] COSTA M H, BOTTA A, CARDILLE J A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 283(1/2/3/4): 206
- [23] HORTON R E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1945, 56(3): 275
- [24] RAUTELA P, LAKHERA R C. Landslide risk analysis between Giri and Tons rivers in Himachal Himalaya (India) [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2000, 2(3/4): 153
- [25] NYMAN J A, DELAUNE R D, PATRICK W H Jr. Wetland soil formation in the rapidly subsiding Mississippi River Deltaic Plain: mineral and organic matter relationships[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1990, 31(1): 57
- [26] KONG D X, MIAO C Y, BORTHWICK A G L, et al. Evolution of the Yellow River Delta and its relationship with runoff and sediment load from 1983 to 2011[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 520: 157
- [27] GAO B C. NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257
- [28] KAMAL M, PHINN S, JOHANSEN K. Assessment of multi-resolution image data for mangrove leaf area index mapping[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176: 242
- [29] LI Z J, SONG L L, MA J Z, et al. The characteristics changes of pH and EC of atmospheric precipitation and analysis on the source of acid rain in the source area of the Yangtze River from 2010 to 2015[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 156: 61
- [30] 李广宁. 大型水库水温结构及取水口前流场研究[D]. 天津: 天津大学, 2015
- [31] SIMS D A, GAMON J A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features[J]. *Remote Sensing of*

- Environment, 2003, 84(4): 526
- [32] TIAN J, PHILPOT W D. Relationship between surface soil water content, evaporation rate, and water absorption band depths in SWIR reflectance spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 169: 280
- [33] 张志昌, 刘亚菲, 刘松舰. 抛物线形渠道水力最优断面的计算[J]. 西安理工大学学报, 2002, 18(3): 235
- [34] 刘昌明, 门宝辉, 宋进喜. 河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J]. 自然科学进展, 2007, 17(1): 42
- [35] BURCHARD H, HETLAND R D, SCHULZ E, et al. Drivers of residual estuarine circulation in tidally energetic estuaries: straight and irrotational channels with parabolic cross section[J]. Journal of Physical Oceanography, 2011, 41(3): 548
- [36] XIE X L, BENI G. A validity measure for fuzzy clustering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(8): 841
- [37] YANG J, SU J F, SONG L J. Selection of manufacturing enterprise innovation design project based on consumer's green preferences[J]. Sustainability, 2019, 11(5): 1375
- [38] GONG M G, SU L Z, JIA M, et al. Fuzzy clustering with a modified MRF energy function for change detection in synthetic aperture radar images[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(1): 98
- [39] JIANG Y Z, CHUNG F L, WANG S T, et al. Collaborative fuzzy clustering from multiple weighted views[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(4): 688
- [40] TU Y Y, CAO X Q, ZHANG S, et al. Fuzzy clustering analysis-based Chinese sports industry scientific and technological innovation's study[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2016, 13(12): 9779
- [41] SU P, SHANG C J, CHEN T H, et al. Exploiting data reliability and fuzzy clustering for journal ranking[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2017, 25(5): 1306
- [42] 李丽华, 陈轮, 高盛焱, 等. 三江平原沼泽土微观特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2295
- [43] 王宇坤. 羌塘高原寒旱核心区土壤-环境关系解析及土壤推理制图[D]. 西宁: 青海师范大学, 2016
- [44] YANG Q G, TIAN J, LIU J, et al. Model tests research on extruding soil caused by close-mouth step cross-section pipe pile[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015: 3843
- [45] 牛耀彬, 高照良, 齐星圆, 等. 不同工程堆积体坡面治理措施对土壤抗冲刷侵蚀能力的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 134
- [46] SCHONSKY H, PETERS A, WESSOLEK G. Effect of soil water repellency on energy partitioning between soil and atmosphere: a conceptual approach[J]. Pedosphere, 2014, 24(4): 498
- [47] ARKHAZLOO H S, EMAMI H, HAGHNIAN G H. Determination the most important physical and mechanical soil properties on increasing cross sections in Ardebil province[J]. Majallah-i āb va Khāk, 2017, 30(6): 2060
- [48] CHASE R B, CHASE K E, KEHEW A E, et al. Determining the kinematics of slope movements using low-cost monitoring and cross-section balancing[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2001, 7(2): 193
- [49] BROXTON P D, ZENG X B, SCHEFTIC W, et al. A MODIS-based global 1-km maximum green vegetation fraction dataset[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(8): 1996
- [50] MOSSA M, MEFTAH M B, de SERIO F, et al. How vegetation in flows modifies the turbulent mixing and spreading of jets[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 6587
- [51] WALKER D A. Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D2): 8169
- [52] DARVISHZADEH R, SKIDMORE A, ATZBERGER C, et al. Estimation of vegetation LAI from hyperspectral reflectance data: Effects of soil type and plant architecture[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(3): 358
- [53] DUAN L X, HUANG M B, ZHANG L D. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 537: 356

Key influencing factors in the spatial variations in river sections: statistical analysis and authentication from satellite data

MING Anyuan¹⁾ XIE Fuming³⁾ ZHAO Changsen^{1,2)†} YANG Shengtian^{1,2)}
ZHANG Chunbin²⁾ PAN Tianli²⁾

(1) College of Water Sciences, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

3) Administration of Xinjiang Manas River Basin, 832000, Shihezi, Xinjiang, China)

Abstract Global ecological environment of river is causing increasing concern in government and research communities. Shape of river cross-section is an important parameter to evaluate ecological environment of river. Traditional measurement methods are mostly based at total stations and level stations. This is not only time-consuming and labor-intensive, but also poses high risks in field work. It is therefore urgent to develop a framework to efficiently deduce the shape of the river cross-section. For this study, the Sanjiangyuan region with less human impact was selected. Multi-source remote sensing data coupled with least square and fuzzy clustering methods were used to explore correlation between shape of cross-section and key impact factors. Among all the influencing factors, drainage area was found to be the most important factor driving shape changes in the river section. As drainage area controlled by the section increased, upstream “narrow-deep” channel form gradually changed to downstream “wide-shallow” form. Geographical environment with high soil pores, large silt content, high slope of section location, and low vegetation coverage was found to be more conducive to the formation of parabolic river sections. The relationship functions of section shape fitting parameters (a), control basin area (S) and width-depth ratio (R_{WD}) were all exponential functions ($a = c_1 e^{d_1 S}$, $R_{WD} = c_2 e^{d_2 S}$). This relationship is suitable for natural rivers in mountainous areas that are less affected by human activities, accurately, to efficiently, and safely obtain the shape of river cross-sections, to provide methodological and data basis for the assessment of water quality, calculation of e-flows, restoration of aquatic ecosystem health as well as conservation of water and soil, being helpful to achieve ecological civilization in China.

Keywords natural river; multi-source remote sensing; cross-section variation; driving factor; Sanjiangyuan region

【责任编辑: 武 佳】