

乌江（重庆段）

总磷解析多情景模拟及 优化决策分析研究

WUJIANG CHONGQINGDUAN

ZONGLIN JIEXI DUOQINGJING MONI JI YOUHUA JUECE FENXIYANJIU

姚瑞华 赵康平 赵越 路瑞 续衍雪 尹真真 等 / 著

中国环境出版社

乌江（重庆段）总磷解析多情景模拟及 优化决策分析研究

姚瑞华 赵康平 赵 越 路 瑞 续衍雪 尹真真 等著

中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

乌江(重庆段)总磷解析多情景模拟及优化决策分析研究/姚瑞华等著. —北京:中国环境出版社, 2017.12

ISBN 978-7-5111-3433-2

I. ①乌… II. ①姚… III. ①乌江—水污染防治—降磷—研究—重庆 IV. ①X522

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 304068 号

出版人 武德凯
责任编辑 孔 锦
责任校对 尹 芳
封面设计 岳 帅



更多信息, 请关注
中国环境出版社
第一分社

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (第一分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京建宏印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2017 年 12 月第 1 版
印 次 2017 年 12 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 8
字 数 150 千字
定 价 59.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

三峡工程是举世瞩目的水利工程，既带来防洪、发电、航运等综合效益，也使长江三峡由自然河道变为季调节型水库，对流域的生态环境产生深远影响。2003 年，三峡水库开始 135 m 水位试验性蓄水，从同年 10 月至今，部分受淹支流回水区开始出现间歇性“水华”现象，与富营养化息息相关的氮、磷营养盐开始受到关注。2009—2010 年，乌江流域贵州段由于磷矿污染造成死鱼事件不断发生，影响重庆段江水总磷浓度持续升高，重庆市环保局就此事致函贵州省环保厅，请贵州省加强监管境内的污染源，严格控制含磷污染物排放，乌江流域磷污染问题逐渐引起广泛重视。2011 年 3 月，环保部环办〔2011〕22 号文规定，总磷纳入水质考核评价，受总磷指标影响，乌江干流水质从以前的Ⅰ、Ⅱ类全部变为Ⅴ类和劣Ⅴ类，长江干流进入重庆朱沱断面和流出重庆的培石断面总磷浓度都超过国家考核浓度，不能达到水域功能要求，总磷污染成为一个不容忽视和回避的问题。

本书基于 QUAL2K 模型原理进行构架，共划分为 26 个河段；支流汇入干流采用零维模型进行测算；在测算每个河段污染物环境容量限值时采用水环境容量计算方法，并且采用“试错模拟法”及“模拟-优化”耦合法等制订多情景的污染物削减方案。对流域污染源防控治理方案进行了优化

设计。

在本书编写过程中，得到了重庆市环境保护局、重庆市环境科学研究院等有关单位专家的大力支持，特此感谢。本书编写的具体分工如下：第1章由续衍雪执笔；第2章由路瑞执笔；第3章由赵康平执笔；第4章由姚瑞华执笔；第5章由赵越执笔。赵康平负责数据分析、资料整理和图件制作等。参加本书研究编写的还有敖亮、尹真真等。全书由姚瑞华统一修改定稿。

受学识和水平所限，书中不妥之处敬请专家和读者批评指正。

2017年4月

目 录

第一章 研究背景.....	1
一、总磷污染形势严峻.....	1
二、长江流域总磷污染凸显.....	3
三、长江总磷研究的必要性分析.....	5
第二章 流域概况.....	8
一、自然环境概况.....	8
二、经济社会概况.....	14
三、水环境质量情况.....	16
四、污染物排放情况.....	29
五、存在的主要问题.....	57
第三章 水体达标系统分析与治理思路.....	60
一、输入响应关系构建.....	60
二、水环境容量限值测算.....	71
三、治理思路.....	92

第四章 主要任务与措施.....94

 一、加强总磷污染控制.....94

 二、加大水土流失防治力度.....103

 三、强化水资源节约、保护与调度.....106

 四、积极协调贵州省开展乌江总磷污染控制.....108

 五、推进执法监管.....108

第五章 效益和目标可达性分析.....110

 一、项目环境效益.....110

 二、目标可达性分析.....111

附 表.....114

附 图.....116

参考文献.....117

第一章

研究背景

一、总磷污染形势严峻

1. 磷在自然界广泛存在

磷是自然界一种重要元素，存在于所有细胞中，对维持生物的生命活动具有不可或缺的作用。磷的来源可以分为内源磷和外源磷。内源磷主要是指沉积在水体底泥中，通过生物、物理或化学的过程缓慢释放的磷。外源磷主要是指通过各类排放源进入水体的磷，包括点源和非点源。

水体中存在各种形态的磷，比较常见的有总磷（TP）、总反应磷（TRP）、总溶解磷（TSP）、溶解反应磷（SRP）、溶解的水解性磷（SHP）、溶解的光解性磷（UVSRP）和颗粒磷（PP）。在磷的控制方面通常使用总磷指标。水体中的溶解态磷主要来自污水处理厂出水，颗粒态磷则主要来自雨水径流，包括农业径流和城市雨水径流。土壤中的磷浓度远高于水体和水体沉积物，一般为 200~5 000 mg/kg，平均为 600 mg/kg。土壤中溶解态磷所占的比例不到 1%，土壤中的植物和藻类能够直接利用的都是溶解态磷。

2. 磷污染具有较大的危害性

磷是藻类生长重要的限制因素。水体中磷浓度一旦过高，容易发生富营养化，

引起藻类的过度繁殖，水体含氧量下降，水质恶化浑浊，鱼虾难以生存，严重破坏水生态。产生的藻毒素（如蓝绿藻）不仅致癌，还会影响供水安全。长期饮用含磷的水可使人的骨质疏松，发生下颌骨坏死等病变，磷还会对人体皮肤造成直接危害，引发各种皮肤炎症，磷化物则会导致呕吐、腹泻、头痛甚至中毒死亡。磷化工生产的有机磷农药能抑制水生植物的生长和繁殖，造成水生动物急性和慢性中毒，抑制内分泌正常分泌水平，引起孵化率下降，对胚胎有致畸作用。同时，含磷的矿山尾矿、渣场等在雨水的淋溶作用下能够进入地表径流或渗入地下水，给外界环境输入大量可迁移的磷，对周围环境和水体造成较严重的污染。

3. 总磷已成为主要污染因子

2015年，全国地表水1940个断面（点位）（其中有75个断面无数据，不参与统计）中，34.0%的断面劣于Ⅲ类，主要污染指标为氨氮、总磷和化学需氧量；全国112个有考核点位的湖泊（水库）中，27.4%的断面劣Ⅲ类，主要污染指标为总磷、化学需氧量和高锰酸盐指数；全国近岸海域国控监测点中，29.5%的断面劣Ⅱ类，主要污染指标为无机氮和活性磷酸盐。四大海区监测的401个日排污水量大于100 m³的直排海污染源中，总磷排放总量为3149.2 t。部分水体总磷污染严重，2015年，全国地表水中约5.1%的断面总磷浓度劣于Ⅴ类，主要集中在河北、北京、河南、贵州、四川等省市。2009—2010年，乌江流域贵州段由于磷矿污染造成死鱼事件不断发生，影响重庆段江水总磷浓度持续升高，重庆市环保局就此事致函贵州省环保厅，请贵州省加强监管境内的污染源，严格控制含磷污染物排放，乌江流域磷污染问题逐渐引起广泛重视。2011年3月，环保部环办〔2011〕22号文规定，总磷纳入水质考核评价，受总磷指标影响，乌江干流水质从以前的Ⅰ类、Ⅱ类全部变为Ⅴ类和劣Ⅴ类，长江干流进入重庆朱沱断面和流出重庆的塔石断面总磷浓度都超过国家考核浓度，不能达到水域功能要求，总磷污染成为一个不容忽视和回避的问题。

二、长江流域总磷污染凸显

1. 总磷普遍超标

总磷已成为影响长江流域水环境质量的首要污染指标。2015 年,长江流域 709 个监测断面中,按照《地表水环境质量评价办法(试行)》(环办〔2011〕22 号)进行评价,总体水质为轻度污染,达到或优于Ⅲ类的断面占 73.4%,Ⅳ~Ⅴ类断面占 19.8%,劣Ⅴ类断面 52 个,占 6.8%,主要污染指标为总磷、化学需氧量和氨氮。

河流断面中,17.7%的断面总磷浓度超过河流Ⅲ类标准(0.2 mg/L),49.3%的断面总磷浓度超过河流Ⅱ类标准(0.1 mg/L);湖库点位中,45.1%的点位总磷浓度超过湖库Ⅲ类标准(0.05 mg/L),69.3%的点位总磷浓度超过湖库Ⅱ类标准(0.025 mg/L)。总磷污染严重地区主要集中在贵州、四川两省,其中贵州重安江的重安江大桥断面、羊昌河的风山桥边断面、清水江的旁海断面总磷浓度分别达到 4.15 mg/L、9.75 mg/L、1.48 mg/L;四川江安河的二江寺断面、釜溪河的碳研所断面、府河的黄龙溪断面总磷浓度分别达到 0.76 mg/L、0.69 mg/L、0.54 mg/L。

2. 区域特征明显

长江流域共涉及 17 个省(市),2015 年各省(市)总磷平均浓度范围为 0.069~0.354 mg/L,贵州省总磷平均浓度明显高于其他省(市),接近地表水Ⅴ类标准(0.4 mg/L),湖北、安徽、重庆、江苏、四川、上海等省(市)总磷浓度也超过了地表水Ⅱ类标准(0.1 mg/L)(图 1-1)。

长江干流共布设 48 个断面,总磷浓度沿程变化趋势为:巫峡口以上江段总磷浓度基本在 0.1~0.15 mg/L;在湖北段浓度明显升高,调关断面达到峰值;之后总磷浓度逐渐下降,江西香口断面有小幅反弹,安徽段总体平稳,总磷浓度控制在 0.1 mg/L 以下;江苏段总磷浓度波动较大,九乡河口断面总磷浓度达到

0.15 mg/L；上海段总磷浓度为 0.13~0.15 mg/L（图 1-2）。

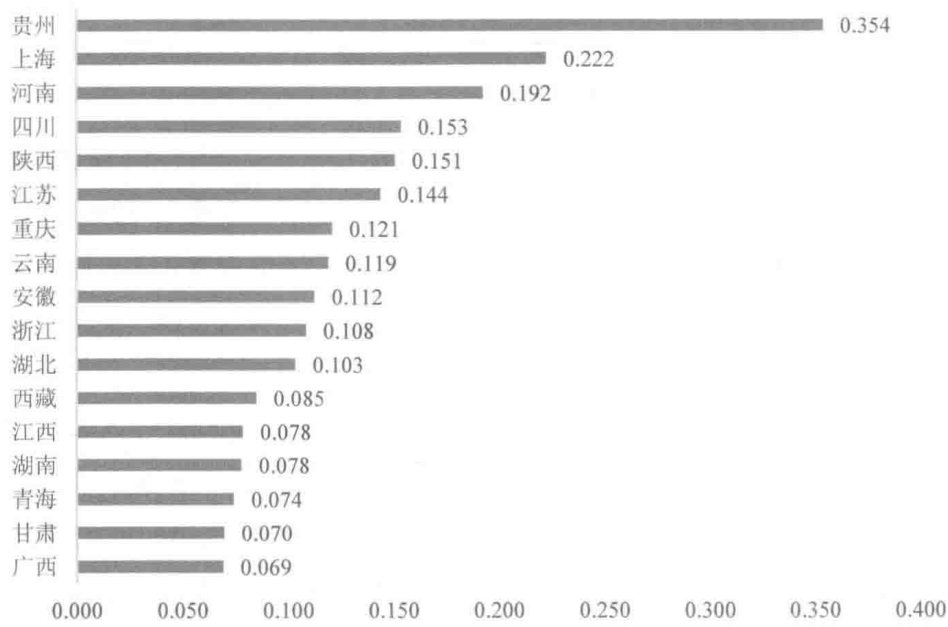


图 1-1 长江流域各省份总磷平均浓度

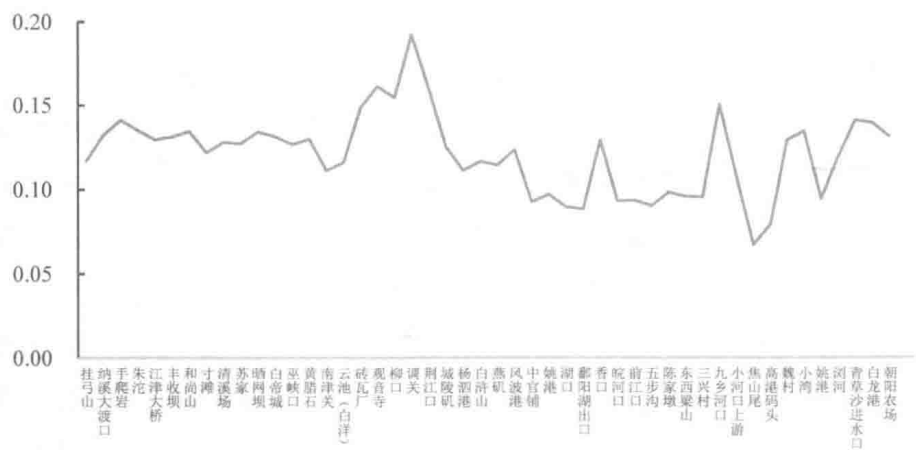


图 1-2 长江干流总磷浓度沿程变化

3. 工业污染突出

长江中上游的湖北、湖南、四川、云南、贵州是我国磷矿主要开采区,5 省磷矿已查明资源储量(矿石量)135 亿 t,占全国资源储量的 76.7%。按矿区矿石平均品位计算,5 省份磷矿资源储量(P_2O_5 量)28.66 亿 t,占全国资源储量的 90.4%。其中,云南省的大型磷矿较多,其总储量也最高;湖北省和贵州省的磷矿数量较多,主要以中型和小型磷矿为主;四川省和湖南省的磷矿数量相对较少,主要以中型和小型磷矿为主。上述地区中低品位磷矿居多,磷矿开采过程中,粗放的开采方式、风化淋溶作用、废土石的不合理处置等极易造成磷的流失。同时,选矿加工过程中,入选 1 t 原矿需要用 2 t 水,尾矿废水中的总磷、化学需氧量、氟化物及可溶性盐等污染物,如果处理不当排入河中会造成地表水体严重污染,喀斯特地区更可危及地下水。

磷化工产业以磷矿为基础原料,主要通过湿法和热法加工生产农业用的化学肥料和工业领域应用的精细磷化工产品。我国有八大磷矿生产基地,分别为云南昆阳,贵州开阳、瓮福,湖北荆襄、宜昌和保康,四川金河、清平等,全部集中在长江中上游。2014 年环境统计数据显示,全国共计 213 家规模以上磷肥制造企业,74%的磷肥制造企业集中在云南、湖北、贵州、四川 4 省。云南云天化、贵州开磷(集团)、瓮福(集团)3 家企业产量超过 1.0 Mt,占全国总产量的 30.9%。国内磷肥企业大多采用二级中和沉淀法、三级中和沉淀法,并预留过滤装置处理废水,企业正常运转时,废水多处理后实现全部回用,但在雨季或企业生产调整的情况下,废水量大时难以保证稳定达标。同时,产生的磷石膏没有得到充分综合利用,磷石膏长期堆放对周边环境造成一定的隐患。

三、长江总磷研究的必要性分析

1. 落实国家系列重大战略部署

加强长江流域生态环境保护是国家的重大战略部署,在推进我国“五位一体”

总体布局建设中具有重要地位。习近平总书记先后强调“走生态优先、绿色发展之路，把长江经济带建设成为我国生态文明建设的先行示范带、创新驱动带、协调发展带；把修复长江生态环境摆在压倒性位置，共抓大保护，不搞大开发；把实施重大生态修复工程作为推动长江经济带发展项目的优先选项，增强水源涵养、水土保持等生态功能”“长江是中华民族的生命河。推动长江经济带发展，理念要先进，坚持生态优先、绿色发展，把生态环境保护摆上优先地位，涉及长江的一切经济活动都要以不破坏生态环境为前提，共抓大保护，不搞大开发。思路要明确，建立硬约束，长江生态环境只能优化、不能恶化。”作为全国水污染防治的行动纲领，《水污染防治行动计划》（国发〔2015〕17号）已将总磷污染防治提升到战略高度，明确规定“选择对水环境质量有突出影响的总氮、总磷、重金属等污染物，研究纳入流域、区域污染物排放总量控制约束性指标体系”“对化学需氧量、氨氮、总磷、重金属及其他影响人体健康的污染物采取针对性措施，加大整治力度。”

2. 保障长江流域生态环境安全

开展长江流域总磷污染防治是保障长江流域生态环境安全的核心工作之一。《关于加强长江黄金水道环境污染防控治理的指导意见》（发改环资〔2016〕370号）要求“对总磷超标的区域开展研究，建立磷总量控制的指标体系”“针对长江流域总磷超标等突出环境问题，梳理排查总磷超标原因，加大对三峡库区及上游、长江干流湖南段和湖北段等重点江段的总磷污染防治。”作为我国重要淡水资源战略储备地和长江流域的重要生态屏障，三峡库区面临富营养化威胁，主要支流水体综合营养状态指数范围为25.9~81.2，富营养的断面占监测断面总数的30.5%；回水区水体处于富营养状态的断面比例为35.6%，比非回水区高10.6个百分点；近年来，在青干河、神农溪、大宁河、磨刀溪、梅溪河、清溪河、芭溪河、汝溪河、东溪河、池溪河、龙河、香溪河等主要支流回水区存在水华现象。

3. 精准防治长江流域总磷污染

长江是世界第三大河流，是我国第一大河流，流域面积约180万 km^2 ，占我

国陆地面积的近 20%。综合考虑长江总磷浓度空间变化情况、涉磷产业布局状况、三峡库区等生态安全格局需求等因素,开展乌江流域重庆段总磷污染研究,解析总磷污染源及主要成因,研究应对总磷污染的防治对策,旨在为《长江经济带生态环境保护规划》与《重点流域水污染防治规划(2016—2020 年)》的组织实施以及为长江流域总磷污染防控提供技术支撑和决策依据。

第二章

流域概况

一、自然环境概况

1. 水系

乌江是长江上游右岸最大的一条支流，流域位于东经 $104^{\circ}10'$ — $109^{\circ}12'$ ，北纬 $25^{\circ}56'$ — $30^{\circ}22'$ 。发源于贵州省境内威宁县香炉山花鱼洞，至沿河县北部进入重庆市酉阳土家族苗族自治县的万木乡、龚滩古镇，折向彭水县、武隆县到涪陵区入长江。乌江干流全长 1 037 km，其中重庆境内 173 km；流域总面积 8.79 万 km^2 ，其中重庆市境内 2.85 万 km^2 。方案范围内主要支流有郁江、芙蓉江、阿蓬江等（表 2-1）。

表 2-1 重庆乌江段主要河流情况

河流	集雨面积/ km^2	境内长度/km	多年平均流速/ (m^3/s)	天然落差/m
乌江	3 903	66	1 650	97
阿蓬江	1 583	80	151	108
郁江	1 336.8	86.2	129	1 589
普子河	824	36.5	20	227
芙蓉江	264.8	28.2	143	120
诸佛江	524.4	44.0	14.4	1 259
木宗河	98.8	17	11.6	194.1

(1) 郁江

郁江是乌江右岸较大的一级支流，发源于湖北省利川市境内的大石桥乡的刘仓坪，河源海拔高程 1 514 m。由北向南在码头山入重庆的彭水县境，在彭水县城汇入乌江，郁江流域地理位置介于东经 $108^{\circ}03'$ — $108^{\circ}50'$ ，北纬 $29^{\circ}08'$ — $30^{\circ}13'$ 。全流域面积 $4\,602.2\text{ km}^2$ ，河流全长 157.4 km。河床平均坡降 8.3%。流域内多年平均降雨量 1 322.4 mm。河口多年平均流量 $135.9\text{ m}^3/\text{s}$ ，多年平均年径流总量 42.9 亿 m^3 。目前，郁江流域内已建成各类水电站 30 余座。

郁江流域西北邻龙河，以七跃山脉为分水岭，北邻湖北的清依江，东北与阿蓬江相邻，东部与诸佛江以西山盖、小厂盖为分水岭。流域水系在彭水境内呈树枝状，平面形状呈长条形。流动地势呈东北高西南低，地周界为高山环绕，河谷深切，山势陡峻，支流多，坡陡急流，雨洪汇流速度快。

从蔡家坝到郁山镇河段，河床开阔，河床坡降平缓，断面不规则，有彭水著名的山门坝、清滩坝，每个坝子粮田在 1 000 亩左右；从郁山镇到河口，河段长 52.4 km，天然落差 55.42 m，河床平均坡降 1.06‰，该段河床坡降主要集中在尾段，从卢渡沟到河口 7 km 河段，集中落差 17.32 m，其次是姚家沟到郁山镇 1.9 km 河段，集中落差 6.1 m，从姚家沟到羊头铺，河床平缓，在河谷的一级阶地上，有大河坝、陈元坝、平天坝、锡滩坝以及县农场等上千亩粮田的大坝子。

(2) 芙蓉江

芙蓉江是乌江左岸的一级支流，源于贵州，经彭水的大垭、润溪进入武陵，在江口汇入乌江。芙蓉江流域面积 $7\,688\text{ km}^2$ ，多年平均流量 $143.28\text{ m}^3/\text{s}$ ，河流在彭水境内长度 28.2 km，天然落差 120 m，河床平均坡降 5.02‰，水能理论蕴藏量 13.1 万 kW。

(3) 阿蓬江

阿蓬江发源于湖北省利川市境内，经朝阳寺，在黔江区县坝乡入境，经县坝、舟白、蓬东、冯家、濯水、两河等 11 个乡（镇），由两河镇的细水村进入酉阳县，再经大河口、梯子洞，到龚滩汇入乌江，全流域面积 $5\,585\text{ km}^2$ ，全长 249 km，平均比降 1.89‰，河口多年平均流量 $151\text{ m}^3/\text{s}$ 。流域内地形主要以中低山为主，

仅沿河流两岸分布有少量平坝，耕地集中，是沿途区县粮食的主产区。流域内气候温和，多年平均气温 $13\sim 15.6^{\circ}\text{C}$ ，多年平均降雨量 $1\,213.0\text{ mm}$ ，多年平均径流深 661 mm ，多年平均当地年径流总量 10.10 亿 m^3 ，过境径流总量 25.81 亿 m^3 。境内主要支流有黔江河、细沙河、太极河、袁溪河等。

（4）诸佛江

诸佛江是乌江右岸的一级支流，发源于黔江区的王家湾，由西向东经石中溪，在风相坪转为由北向南经鹿子坪，在王家岩进入彭水县境，由东北向西南在梅子坝又转为由东向西经何家弯后，又由东北向西南经诸佛寺、倒朝门、谭家坝，在龙门峡汇入乌江。诸佛江东北邻阿蓬江，南接乌江，西与郁江相邻，以西山盖、小厂盖为分水岭。地理位置介于东经 $108^{\circ}18.2'$ — $108^{\circ}30'$ ，北纬 $29^{\circ}07.5'$ — $29^{\circ}25.7'$ 。主河道全长 60.09 km ，其中彭水县境内河段长 44 km 。诸佛江流域面积 760 km^2 ，其中彭水境内流域面积 667.5 km^2 。流域内平均降雨量 $1\,174.4\text{ mm}$ 。多年平均径流深 600 mm ，多年平均流量 $14.46\text{ m}^3/\text{s}$ 。水系在梅子坝以上呈羽型分布，梅子坝以下呈树枝状，流域平面形态呈长条型。

诸佛江源头水面高程 700 m 。与乌江汇合口高程 226.6 m ，天然落差 473.4 m ，河床平均坡降 9.5% ，其中黔江段落差 230 m ，平均河床坡降 13.53% ，彭水段落差 243.4 m ，平均河床坡降 5.65% 。

诸佛江河床狭窄，河床坡降大，切割深，有 50% 的河段呈“U”形河谷，两岸绝壁，垂直高度 $50\sim 200\text{ m}$ 。流域内森林覆盖率 20% 左右，植被较好。

诸佛江流域境内西北以东山盖为界，东南以羊儿岩山脉为界，流向由北东向南西，地势呈西北高东南低，属于中深切割的中山区。山脉呈北东或北东走向，与区域构造线基本一致。该流域出露地层以下古生界寒武系、奥陶系、志留系的海相，滨海相沉积岩为主，岩性主要为灰岩、白云质灰岩、白云岩、砂页岩、石英砂岩等。诸佛江流域在构造上属新华夏系第三沉降带三四川盆地东南缘，基本构造格架为筲箕滩背斜，桑柘坪向斜，伴有北东向的张扭，压扭性断层。