

张家界地貌 发育过程研究

ZHANGJIAJIE DIMAO
FAYU GUOCHENG YANJIU

师长兴 齐德利 王随继 等 / 著



中国环境出版社

张家界地貌发育过程研究

师长兴 齐德利 王随继 等 著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

张家界地貌发育过程研究/师长兴等著. —北京: 中国环境出版社, 2016.11
ISBN 978-7-5111-2931-4

I. ①张… II. ①师… III. ①张家界—地貌发育—研究 IV. ①P942.640.76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 255256 号

出 版 人 王新程
责任编辑 刘 焱
责任校对 尹 芳
封面设计 彭 杉

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)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2016 年 11 月第 1 版
印 次 2016 年 11 月第 1 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 12 彩插 2
字 数 230 千字
定 价 49.00 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

在湖南省张家界市武陵源区分布着 3 000 多座高几十米到 400 多米的石柱峰，与方山、平台、石墙、天生桥、嶂谷一起形成鬼斧神工般的自然景色，集雄、奇、险、幽、旷、秀于一体，被学者冠以张家界地貌，因其组成和形象又被称为张家界砂岩峰林地貌。这种地貌属于一种独特的砂岩地貌类型，具有系统性、完整性、自然性、稀有性和典型性等自然属性，以及极高的美学与生态旅游价值和重要的科研与科普价值。先后被列入国家地质公园、世界自然遗产名录和首批世界地质公园，每年吸引几百万名游客观光游览。

自张家界砂岩峰林地貌美学与旅游价值被发现以来，从科学的角度认识其形成和演化规律已成为许多专家学者努力的方向。1981 年湖南师范大学翟辅东教授等人首次对张家界地貌的成因进行解释，推翻了当时省内外媒体把张家界定名为丹霞地貌的错误结论。之后不断有越来越多的学者对张家界地貌的类型、特征、地质基础、形成发育过程以及作为旅游资源的价值和保护等问题开展研究。鉴于张家界砂岩峰林地貌在社会和学术界的影响迅速扩大，1984 年由湖南省省地质学会主持在张家界市召开了“张家界、索溪峪风景地质地貌类型现场鉴定会”，2010 年在张家界召开了首届砂岩地貌国际学术研讨会。

科学研究无止境，深入认识张家界地貌形成和演化历史对于保护张家界地貌旅游资源、保障游客安全和提高科学旅游水平具有重要意义。对张家界地貌形成和演化研究中，以往更侧重于地质基础，在砂岩地貌发育过程和驱动因素研究方面有所不足。张家界三千多砂岩石柱的形成除了有利

的地质基础条件,水流是塑造张家界地貌的主要营力。从岩石的风化,到岩石碎屑的侵蚀和搬运,无处不有水的参与,流域的水文特性所决定的产流过程,为物质搬运提供了动力条件。正是水流的作用,从原始平坦的砂岩,切削出峻拔峭立、形态瑰奇的砂岩峰柱。因此定量分析侵蚀作用、水文过程与地貌过程及其耦合关系,研究河床、河谷到河网的形成与发展过程以及地表侵蚀过程和地貌发育阶段,从而更好地阐明张家界地貌发育的动力机制,准确刻画张家界地貌发育过程,为景区自然遗产的保护和持续利用提供科学依据,同时满足广大人民群众日益提高的科学素质对张家界地貌科学涵义及文化背景的要求,提升科技界对张家界地质公园的认知程度,提升张家界的科技形象。以此为目的,张家界武陵源区拨款资助了“张家界地貌发育演化动力过程研究”科研项目。项目历时两年(2012年3月至2014年3月)。项目研究目标是通过开展河流水文泥沙特性与产流产沙过程、河流水沙变化对于气候变化与人类活动的响应、河流产水产沙的模拟、历史洪水研究、水系河网与河谷特征及影响因素、河流河床地貌特征及其调整过程、地表侵蚀过程及地貌发育阶段等方面的研究,揭示砂岩峰林地貌发育的动力机制和主要驱动因素,查明风景区地貌演化的物质通量变化过程,科学解释研究区河流地貌和砂岩景观发育历史,充实张家界世界地质公园的地貌科学数据库,为增进地质公园的科普宣传以及公园的景观保护和建设提供更为坚实的科学基础。在项目组全体成员的共同努力下,最终完成了预定的研究任务,实现了研究目标。本书是这一项目研究成果的总结。

项目由中国科学院地理科学与资源研究所和湖南省张家界世界地质公园管委会共同承担,参加课题的科研人员包括:中国科学院地理科学与资源研究所师长兴、齐德利、王随继、方海燕、闫云霞、郑明国、孙莉英、余国安、颜明、Hendrik May(访问学者)、马元旭、周园园、邵文伟。

在项目执行过程中,得到了中国科学院院士、中国科学院地理科学与

资源研究所研究员郑度先生、北京大学地理系崔之久教授、中国地质科学院陈安泽教授、湖南师范大学翟辅东教授、中国科学院地理科学与资源研究所李炳元研究员、中国地质大学田明中教授、张家界市国土资源局陈永明高级工程师、中国科学院地质与地球物理研究所杨小平研究员、中国科学院地理科学与资源研究所黄河清研究员等专家学者的指导，在此谨致诚挚的感谢。在多次实地调查和野外工作中，张家界市国土资源局武陵源分局宋宏明局长、陈冬生副局长、毛善文主任等领导在许多方面给予了大力支持和关怀，在此谨向他们表示衷心的感谢。

本书由项目组全体成员协作完成，各章执笔人如下：第1章，师长兴、齐德利；第2章，郑明国；第3章，孙莉英；第4章，方海燕；第5章，贺莉；第6章，师长兴；第7章，闫云霞；第8章，王随继；第9章、第10章，师长兴；第11章，颜明。全书由师长兴汇总和统稿。由于研究区水沙以及其他相关过程观测数据少，作者水平有限，研究成果中不可避免存在错谬和不足之处，敬请指正和提出建议，以便加以改进与提高。

作者

2016.7

目 录

第 1 章 绪 论.....	1
1.1 张家界地貌形成环境.....	1
1.2 张家界地貌发育演化动力过程研究.....	5
第 2 章 气候变化和人类活动影响下澧水流域水沙变化.....	11
2.1 澧水流域概况及研究方法.....	12
2.2 径流及其组分变化.....	18
2.3 产沙变化.....	28
2.4 小结	36
第 3 章 溇水水文泥沙特性与产流产沙过程.....	38
3.1 溇水流域地理概况.....	39
3.2 溇水流域年水沙变化阶段划分.....	40
3.3 溇水流域年水沙变化特征.....	41
3.4 溇水流域年内水沙变化特征.....	44
3.5 溇水流域洪水规模及其变化规律.....	47
3.6 不同阶段洪水径流量和输沙特征.....	49
3.7 不同阶段洪水水沙关系特征.....	52
3.8 不同阶段最大洪水输沙特征分析.....	54
3.9 影响因素分析.....	59
3.10 小结	61
第 4 章 溇水流域侵蚀产沙模拟.....	65
4.1 研究区概况.....	66

4.2	WaTEM/SEDEM 模型	67
4.3	WaTEM/SEDEM 模型在溁水流域的应用	71
4.4	小结	73
第 5 章	张家界地质公园水化学特征	74
5.1	野外调查及采样	75
5.2	澧水和溁水主要水文站离子化学特征	76
5.3	溁水离子化学特征	79
5.4	小结	82
第 6 章	溁水上游径流过程与推移质输沙	83
6.1	径流和推移质输沙过程测量分析方法	84
6.2	河床断面形态和河床粒度组成测量结果	87
6.3	水位和流量测量结果	90
6.4	推移质输沙量	97
6.5	小结与讨论	100
第 7 章	溁水干支流河道沉积物粒径的空间变化及分形特征	102
7.1	研究方法	103
7.2	砾石粒度组成的差异及空间分布	106
7.3	溁水干支流河道砾石组成的分形特征	111
7.4	小结	114
第 8 章	甘溪砾石沉积物粒度的空间变化及其原因	115
8.1	研究区概况	116
8.2	粒度参数计算方法	117
8.3	砾石粒度分布特征及其水动力响应	119
8.4	砾石粒度参数特征及砾石运移机制	122
8.5	小结	124

第 9 章 漆水河谷与流域形态特征及其地貌意义	125
9.1 漆水流域概况	125
9.2 流域和河谷形态定量指标	126
9.3 漆水河谷剖面特征	128
9.4 面积—高程积分值空间变化特征	133
9.5 地貌特征与地貌发育关系	137
9.6 小结	138
第 10 章 漆水河谷裂点特征与砂岩石柱形成年代	140
10.1 裂点的识别和裂点迁移速率计算方法	141
10.2 漆水干流上的裂点	144
10.3 漆水主要支流干流上的裂点	146
10.4 裂点的迁移过程	151
10.5 裂点迁移对砂岩石柱形成年代的指示意义	157
10.6 小结	158
第 11 章 我国砂岩地貌研究进展	159
11.1 三类砂岩地貌的命名及定义	159
11.2 三类砂岩地貌的分布	160
11.3 三大地貌的形成机制	161
11.4 砂岩地貌的物质组成	163
11.5 砂岩地貌的研究方法	164
11.6 小结及展望	165
参考文献	166
彩 图	183

第 1 章

绪 论

1.1 张家界地貌形成环境

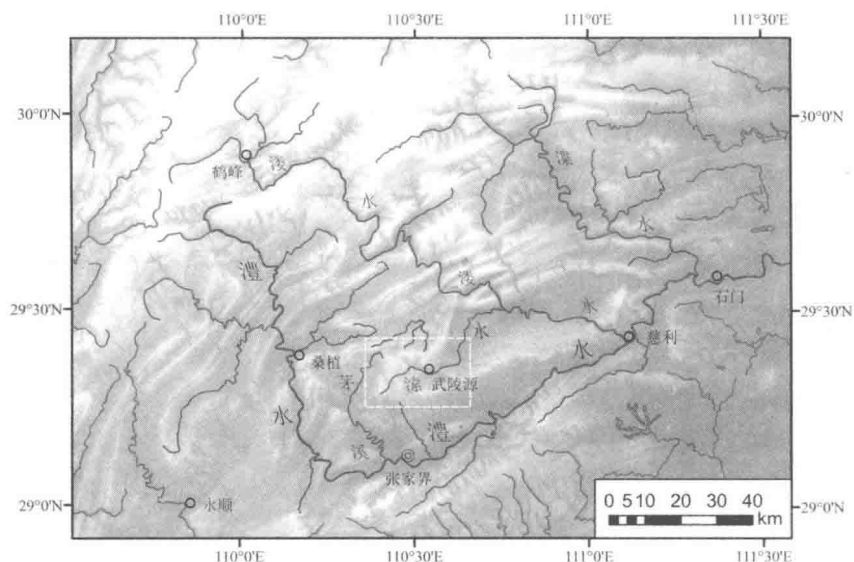
张家界砂岩峰林地貌或张家界地貌是一种典型砂岩地貌。这种地貌以棱角分明的高大石柱林为主,包括深切嶂谷、石墙、天生桥、方山、平台等多种景观组合,呈现出千嶂万峰、磅礴浩然的景观(翟辅东和熊绍华,1988a)。这一地貌作为旅游资源在砂砾岩地貌中属于极品级(陈安泽,2004)。自1980年著名画家吴冠中将张家界地貌奇异景色介绍给广大世人后,随着旅游业的发展,其旅游资源价值得到了极大的重视。作为风景区和保护区的主要组成部分,于1982年被批准为省级自然保护区,1988年被列为国家重点风景名胜区,并在1992年被联合国教科文组织列入《世界自然遗产名录》,2001年被批准为国家地质公园,2004年成为首批被联合国教科文组织批准的世界地质公园。

张家界世界地质公园位于北纬 $29^{\circ}13'18''$ — $29^{\circ}27'27''$;东经 $110^{\circ}18'00''$ — $110^{\circ}41'15''$,面积为 398 km^2 ,包含砂岩地貌和岩溶地貌。其中石英砂岩峰林地貌最典型的核心区面积约 86 km^2 ,集中发育了3100多座拔地而起的石英砂岩石柱,其中高度超过200 m的有1000多座,金鞭岩高达350 m。

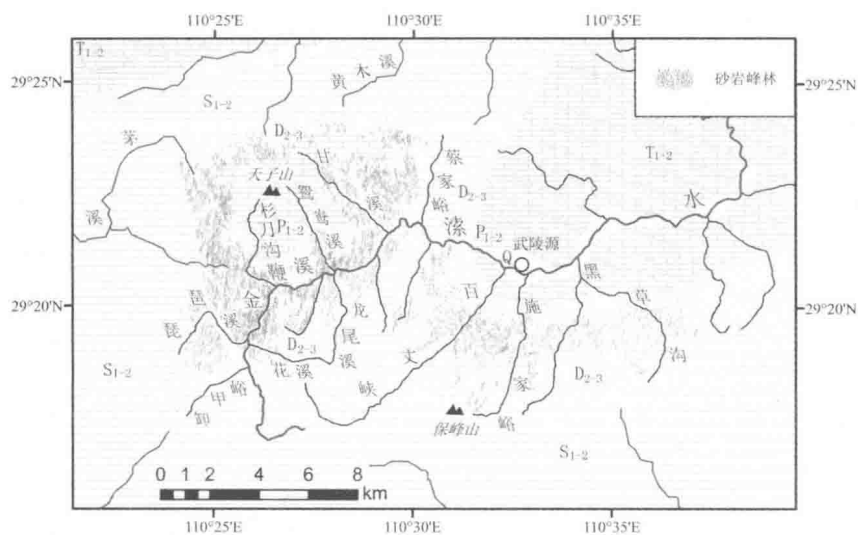
1.1.1 地理背景

由于其形成需要比较独特的条件,迄今张家界地貌只发现于湖南省西北部张家界武陵源区,并且荟集在武陵山脉东北部的天子山周围及保峰山北坡王家峪至黑草沟之间。天子山最高海拔1256 m,至黑草沟沟口地面高度降低至约300 m,峰谷高差大,石英砂岩峰林分布海拔高度介于500~1100 m。这里属于澧水的中上游,处于澧水支流茅溪河源、溇水(澧水支流)支流溇水中上游和黄木溪(咯

斯特断头河)河源,其中砂岩峰林分布区的92%集中于澧水中上游(图1-1)。天子山东部和南部是澧水上游左侧支流的汇流区,包括甘溪、鸳鸯溪、杉刀沟、琵琶



(a) 张家界地貌分布区在澧河流域中的位置



(b) 张家界地貌发育区地层及水系(岩性注释见彩图3)

图 1-1 张家界地貌分布位置图

琵琶溪等及甘溪以上琵琶溪以下溁水干流(鸳鸯溪、龙尾溪等汇口以上又称金鞭溪)南北两岸。这里分布着张家界砂岩峰林景观的精华,如十里画廊(甘溪两侧)、袁家界(属杉刀沟)、黄石寨(属琵琶溪)、金鞭溪。保峰山北坡王家峪至黑草沟之间砂岩峰林分布区位于溁水中游的南侧,沿百丈峡和施家峪也有砂岩峰林景观的精品。

张家界地貌发育区具有中亚热带山地型季风湿润气候。按1960—2010年气象站观测记录,砂岩峰林区多年年均气温 16°C ,一月平均温度为 4.6°C ,七月和八月平均温度为 27°C ;年平均降水量为 $1\,400\text{ mm}$,降水集中在4—8月,占年降水量的67%;年平均相对湿度为78%;年均日照时数为 $1\,290$ 小时。区内植被以常绿阔叶林为主,发育山地黄红壤、黄壤、准黄壤以及石灰土。

1.1.2 地质基础

张家界陡立千尺砂岩石柱景观形成的物质基础是中上泥盆统(D_{2-3})石英砂岩(彩图3),其中中泥盆统为紫红色、灰白色厚层石英砂岩夹薄层或中厚层泥质粉砂岩、砂质页岩,厚约 600 m ,上泥盆统为灰黄色、浅红色粉砂岩夹页岩、铁质泥岩及含铁石英砂岩,厚 $0\sim 40\text{ m}$ (翟辅东,1983;陈国达,1993;吴忱和张聪,2002;黄林燕等,2006)(最近赵逊等(2011)研究认为中泥盆统上部云台观组为灰白色、紫红色石英砂岩、含砾砂岩,最大出露厚度 330 m ;下部小溪组为灰绿色石英砂岩、管状砂岩,最大出露厚度 307 m ;上泥盆统上部写经寺组为灰绿色页岩及泥灰岩,最大出露厚度 33 m ,下部黄家碛组为灰绿—浅灰色砂岩、页岩夹2~3层赤铁矿层,出露厚度约 41 m)。这套巨厚的石英砂岩石英含量高、颗粒较均匀、结构致密、产状近水平,具有密集发育的共轭垂直节理。垂直节理发育有利于侵蚀沿节理发展,岩层近水平有助于保持石柱屹立不倒。泥盆系顶部含铁砂岩,具有较强的抗蚀力,对柱峰能起到保护作用,形成比高巨大的石柱(翟辅东和熊绍华,1988a;陈长明等,1991;唐云松等,2005)。

中上泥盆统的岩性和结构构造源于湘西北的地质构造演化历史。张家界所在的湘西北地区经过元古代造陆运动转化为地台区后,地壳以大范围整体缓慢升降为主(陈国达,1993)。早古生代地壳下降堆积了厚层的碳酸盐岩和碎屑岩。志留纪末加里东运动中湘西北大面积抬升,导致上志留统和下泥盆统缺失(赵逊等,2011)。中泥盆纪湘西北地壳沉降,形成稳定的陆缘浅海环境,因此堆积了巨厚的 SiO_2 含量高达 $79.40\%\sim 97.20\%$ (黄林燕等,2006)、颗粒组成均匀的石英砂岩(陈

国达, 1993), 其中在泥盆纪晚期, 湘西北地壳有升有降, 沉积环境不断变化, 形成含铁石英砂岩和赤铁矿层夹层。晚泥盆纪末期以后海西运动中地壳上升运动, 造成石炭系缺失。从二叠纪起地壳再次下沉并在上下振荡中沉积了碳酸盐岩为主的二叠系和三叠系地层。到晚三叠世早期印支期的安源运动, 使泥盆系至中三叠统地层发生褶皱变形和断裂; 其后三叠纪末燕山运动中, 张家界地区发生早期的挤压造山运动和晚期的区域性伸展裂陷运动(赵逊等, 2011)。在挤压褶皱变形和断裂构造运动中, 位于三官寺向斜西南端的张家界砂岩峰林核心景区地层产状保持近水平至缓倾斜, 同时挤压褶皱变形和断裂构造运动导致泥盆系石英砂岩发育密集的走向 NE-SW、NW-SE、N-S 的三组倾角大多大于 80° 的垂直节理, 由此为形成独特的砂岩峰林地貌奠定了物质基础(陈国达, 1993; 赵逊等, 2011)。

1.1.3 张家界地貌的形成

张家界地貌塑造成型于新生代, 在新生代喜马拉雅运动和新构造运动中, 地壳间歇性抬升, 泥盆系砂岩上覆盖层被剥蚀, 抬高剥露的石英砂岩地层在流水和重力侵蚀下逐渐成型。新生代地壳间歇抬升的证据存在于不同高度上的夷平面。但是目前还没有确凿的夷平面形成时代的证据, 已有研究都是从各自对张家界景区地貌的观察和通过区域对比, 提出不同的夷平面分级和时代(陈长明等, 1991; 周中民, 1994; 吴忱和张聪, 2002; 赵逊等, 2011)。其中对海拔分别在 800~1 000 m 和 1 000~1 200 m 或 1 100~1 300 m 高度的峰顶面与山顶面认识比较统一。其中山顶面为形成于 23 Ma 前燕山和喜马拉雅运动之间始新世晚期至渐新世的湘西期夷平面(吴忱和张聪, 2002; 赵逊等, 2011); 峰顶面形成于晚第三纪末期(陈长明等, 1991; 周中民, 1994; 吴忱和张聪, 2002; 赵逊等, 2011)或中新世甚至更早(赵逊等, 2011), 作为砂岩峰的顶面, 即泥盆纪石英砂岩层顶, 呈现为宽谷面或侵蚀面。自泥盆纪石英砂岩层顶宽谷面形成后, 因地壳抬升和河流溯源侵蚀, 石英砂岩被切割, 砂岩峰林逐渐发育成型。由于对构造运动历史和夷平面发育的认识不同, 因此有的学者认为张家界砂岩峰林形成于第四纪(陈长明等, 1991; 陈国达, 1993; 周中民, 1994; 吴忱和张聪, 2002), 有的认为形成于更早的地质历史时期(赵逊等, 2011)。最近, 有学者通过对溇水和茅溪下游河流阶地以及溇水黄龙洞沉积物调查和测年分析, 分析认为砂岩峰林最早形成于中更新世(平亚敏等, 2011)。在地壳抬升, 河流侵蚀基准面下降, 溯源侵蚀过程中, 从河口向河源经历了不同的侵蚀历史, 发育了不同的正负地貌形体。按发育阶段从幼年到老

年,正地貌分别为岩岭、方山,到岩墙、塔峰,再到柱峰,最后到低丘、残丘(翟辅东,1983;吴忱和张聪,2002;唐云松等,2005);负地貌从裂隙谷、嶂谷到“V”形谷,再到“U”形谷(吴忱和张聪,2002)。

1.2 张家界地貌发育演化动力过程研究

与张家界砂岩峰林走出“闺房”的同时,张家界砂岩峰林景观就进入科研工作者的视野。近三十多年来,我国学者对涉及砂岩峰林石柱的形态类型、岩石组成、构造条件、地质历史、地貌发育阶段和模式、形成时代等问题开展了大量研究。经过众多地理学家和地质学家对张家界峰林地貌进行反复多次的调查研究,使得张家界世界地质公园成为了目前国内砂岩地貌相关研究程度最高、成果产出最多的研究区。但是我们对张家界地貌的认识还仍有限。为保护旅游资源、保障游客安全和提高科学旅游水平,以及深入认识这种独特的砂岩地貌类型在科学上的价值,需要对其开展进一步科学研究,特别是过程的定量研究。

为此,张家界武陵源区从2008年开始,连续多年划拨专项基金资助张家界世界地质公园地质遗迹保护相关的各类科研项目,第一期资助项目“张家界地貌地质特征及其地质景观成因研究”和第二期资助项目“张家界世界地质公园砂岩峰林地貌形成时代及地壳稳定性研究”业已完成并取得了可喜的成绩,部分研究成果正陆续转化为公园建设和保护的有力支撑。

如上所述,张家界砂岩峰林是在地壳抬升后,因为河流侵蚀基准面下降引起的溯源侵蚀过程中,河谷下切而塑造形成。即水流的侵蚀与搬运作用是张家界砂岩峰林发育的主要外动力。张家界具有亚热带湿润山地气候,降雨充足,河网交错,有峰三千,水八百之称(陈长明等,1991)。丰富的降水和径流为张家界地貌的塑造提供了充足的动力。深入认识张家界地貌形成与发育的机制与过程,需要开展侵蚀作用、水文过程、泥沙和溶解质的搬运过程,以及河床、河谷、河网和流域地形地貌特征及其形成与发展过程研究。为此,张家界武陵源区委托中国科学院地理科学与资源研究所和湖南省张家界世界地质公园管委会开展了“张家界地貌发育演化动力过程研究”项目研究工作。

1.2.1 研究内容

开展张家界地貌发育演化动力过程研究的目的是通过对张家界世界地质公园

河床、河谷和河网特征及河流水沙过程和地貌过程的系统研究,揭示砂岩峰林地貌发育的动力机制和主要驱动因素,查明风景区地貌演化的物质通量变化过程,充实张家界世界地质公园的地貌科学数据库,为增进地质公园的科普宣传以及公园的景观保护和建设提供更为坚实的科学基础。为此设以下研究内容:

- (1) 河流水文泥沙特性与产流产沙过程。
- (2) 河流水沙变化对于气候变化与人类活动的响应。
- (3) 河流产水产沙的模拟。
- (4) 历史洪水研究。
- (5) 水系河网与河谷特征及影响因素。
- (6) 河流河床地貌特征及其调整过程。
- (7) 地表侵蚀过程及地貌发育阶段。

1.2.2 研究进展

通过广泛收集研究区的地质、地貌、土壤、植被、气象、土地利用、水文泥沙等资料,开展大量的野外考察、采样、地形和河床物质颗粒组成测量及定点水文观测,围绕上述研究内容,经过对数据资料的深入分析和理论探讨,我们在张家界地貌发育演化动力过程诸多方面,包括研究区径流和泥沙通量、化学物质通量、河床物质组成特征、河谷和流域地貌发育过程等问题上取得了新的认识。在径流泥沙通量(产输)方面,设站和实地观测获得了张家界地貌核心景区溇水上游流域径流序列,分析揭示了径流过程变化特征、流量量级组成以及河床水力特性,估算出推移质输沙量;模拟计算出溇水流域产沙模数和空间分布;分析研究了澧水和溇水流域径流和泥沙变化特征及其对气候变化和人类活动的响应,从不同时空尺度上,揭示了张家界地貌发育区所在自然区域的产输沙变化特征。在化学物质通量方面,以掌握研究区化学剥蚀量为目的,结合实地采样分析和水文站数据,估算出了张家界核心景区溇水上游的离子径流模数。河床物质组成研究分析揭示出砂岩石柱发育区以崩塌和水流侵蚀搬运过程为主形成的河床沉积物粒度组成特征,推移质搬运的临界粒径。河谷和流域地貌形态特征研究从河流地貌侵蚀循环的角度阐释了张家界地貌发育的阶段,从干支流裂点分布特征并利用河流水力侵蚀模型分析揭示了溇水河谷侵蚀下切过程和速率以及张家界砂岩石柱开始发育的年代。项目的主要进展概括如下:

- (1) 通过对澧水流域水沙过程研究发现,尽管流域中上游下垫面特性发生了

显著变化,包括森林覆盖率的显著增加和大量水库的修建,澧水中上游近期(2007—2011年)相对于1985年以前的河历年径流总量基本保持稳定,变化率小于10%。而且研究区径流地上和地下的分配格局也没有发生变化,年基流量和年地表径流量在两个时段也保持不变。人类活动并没有改变降雨径流关系,气候因素对年径流量的影响也不大。鉴于研究区径流量非常充沛,可以认为未来有限时间段内,人类活动很难对径流总量产生影响。人类活动尽管没有改变年径流总量及其组分,但在日时间尺度上对径流过程产生了重要影响。径流及其不同组分的历时曲线对人类活动的响应各不相同。与1985年以前时段比,由于植被对汇流的延缓和水库的调蓄,2007年以后地表径流在洪峰期流量变小而其他时段变大,而地下径流的汇流受植被和水库影响较小,除枯水期外,其他时段地下径流流量与1985年以前比变化不大。总径流流量历时曲线的变化在洪峰期和常水期与地表径流组分一致,而在枯水期与基流组分一致,洪峰期流量的减小表明2007年以后研究区洪水风险显著降低和可利用水资源量的增加,但部分河段枯水径流的大幅减小可能会对河道生态系统产生严重的负面影响。

与径流变化不同,由于洪水期流量的降低和水流含沙量的降低,2007年以后河流产沙比1985年以前时段约降低了80%,这与研究区植被恢复、水土流失治理以及水库修建有密切关系。但目前的土壤侵蚀速率可能仍然高于土壤流失容许速率,河道里的泥沙淤积可能会造成水库使用寿命降低,研究区仍然需要进一步进行植树造林和水土流失治理。

(2) 澧水流域输沙特征年际变化规律研究,揭示出澧水流域1966年(有资料的25年)以来,年均径流量为51.6亿 m^3 ,年均输沙量为196万t,年均含沙量变化范围为0.01~0.95 kg/m^3 ,澧水流域水沙特征变化过程划为三个阶段:1966—1969年、1970—1985年和2007—2011年。年径流量和年输沙量在三个阶段中都分别呈现明显增加、缓慢增加和减少的变化趋势。从整个时间序列看,年均径流量变化不大,而年均输沙量却剧烈减少。流量—含沙量的关系在前后两个时期呈现三次曲线关系,含沙量随流量变化存在临界值。中间一个时期年均含沙量和年均流量的关系符合幂函数关系,表明该时期,年均含沙量随年均流量的增加呈幂函数增加。流域输沙主要发生在汛期。“月均流量—月均含沙量”滞后环表明坡面泥沙侵蚀搬运存在季节性“存储—释放”过程,且不同时期“存储—释放”发生的季节有所不同。

通过分析澧水流域洪水输沙特征发现,澧水流域以夏季(6—8月)洪水为主,

最大洪峰流量在 $500 \sim 1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 内洪水频率最高,洪水对溇水流域输沙量的贡献远大于水量的贡献,2007年后,溇水流域最大洪峰流量和输沙量明显减少。水沙关系分析表明由于80%属峡谷区且落差较大,溇水流域泥沙来源相对不充足。相对1966—1969年,1970—1985年溇水流域洪水输沙能量有所增加,而侵蚀搬运能力降低。2007年后溇水流域洪水输沙能量降低,而侵蚀搬运能力上升。1966—1969年及1970—1985年,以顺时针滞后环为主;而在2007—2011年,以逆时针滞后环和8字形滞后环为主。反映溇水流域悬移质输沙来源从河道向坡面或上游较远的地方转移。

溇水流域水沙过程影响因素复杂,溇水流域年径流量与年降雨量呈线性相关,年输沙量和年降雨量没有密切的线性关系,2007年后,年径流量、输沙量、洪水输沙量剧烈降低,在很大程度上受水库面积增大的影响,但其他因素也起到一定的作用。

(3) 采用 WaTEM/SEDEM 模型模拟计算了溇水流域侵蚀产沙空间分布和产沙量,结果显示双枫潭以上溇水流域年均产沙模数为 $631 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。受地形和土地利用的影响,流域侵蚀模数在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 坡度范围内总体呈现沉积,而在大于 10° 的坡面上侵蚀强度随坡度增加而增加。流域内旱地土壤侵蚀强度为 $3\,345 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,草地侵蚀速率为 $430 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;林地和灌木林用地总体上表现为沉积,其沉积速率分别为 $110 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 $83 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

(4) 通过分析澧水、溇水主要水文站和溇水上游实测水化学组成数据,发现溇水流域的离子径流模数和矿化度在澧水流域属偏大的流域。根据水文站的历史数据大致估算出溇水上游每年的离子(包括溶解性 SiO_2)径流量约为1.5万t。其中,优势离子为 Ca^{2+} ,然后依次是 SO_4^{2-} 、 SiO_2 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 。干支流中,杉刀沟、鸳鸯溪和甘溪的离子质量浓度整体较高,尤以杉刀沟最高;琵琶溪和龙尾溪的离子质量浓度相对较小。

(5) 利用水位实测数据,以及河道测量和河床质采样分析,计算结果显示溇水溇溪峪水库库尾以上面积 71.1 km^2 的流域内,2012年4月至2013年9月两个连续的时段共480天内总径流量为0.763亿 m^3 ,平均流量 $1.88 \text{ m}^3/\text{s}$ 。流量量级主要集中在 $0.1 \sim 10.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量范围,占时段总流量的78.6%。实测期间径流过程中大流量量级的分布呈对数正态分布。溇水上游主要为降水产流,径流与降水关系好,产流系数接近0.34,时段平均基流系数为0.491。实测期间内发生了25个洪峰过程,洪峰最大洪峰流量介于 $3.28 \sim 80.1 \text{ m}^3/\text{s}$,洪峰水量介于60万~763万 m^3 ,