

中国近40年来地貌学研究的回顾与展望

程维明^{1,2}, 周成虎¹, 申元村¹, 刘樯漪^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 地貌学是地理学的一门主要分支学科, 其研究成就与发展一直倍受人们关注。本文对中国近60年来的研究状况, 尤其近40年来研究历程进行了回顾, 从总结经验与发展态势出发, 对地貌学科未来发展方向提出了展望。分析认为, 中国地貌学科在地貌基本类型、区划以及分支学科: 包括动力地貌学(包括冰川地貌、冰缘地貌、风沙地貌、黄土地貌、喀斯特地貌、河流地貌、海岸地貌等)、构造地貌学、气候地貌学、古地貌、岩石地貌学(包括丹霞地貌、花岗岩与流纹岩地貌)、其他地貌类型(包括重力地貌、人工地貌)等方面取得重大进展, 地貌学已逐渐发展成为一门拥有完整学科体系的科学。通过回顾认为, 应坚持地貌成因、形态相统一的原则发展传统地貌与综合地貌。加强地貌基础理论与综合地貌研究、开展地貌结构及其功能研究、构建全方位资源环境地貌信息系统、加强海岸地貌与海洋地貌研究、加强人才培养和学术团队建设, 将是中国实现地貌强国目标的主要途径。

关键词: 回顾; 展望; 地貌学; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201705001

地貌学是研究地球表层形态特征、成因、分布及其演变规律的学科, 又称地形学^[1]。由于它是人类生活、生产、生存的载体, 更是当今社会进行生态环境建设、资源质量评估与合理利用、城乡用地与交通发展研究的对象, 因而倍受人们的关注。随着国家的不断发展, 中国地貌学研究在服务于国家建设、城乡发展、资源利用、生态建设等方面做出了重大贡献, 学科本身也取得了较大进展。本文统计了1978年以来地貌学发表的相关中文论文, 着重分析了地貌学科体系以及各分支地貌40年来的研究进展, 并对地貌研究未来发展态势做出展望, 以求对地貌学的发展有所裨益。

1 近40年来中国地貌学术论文回顾

1.1 论文发表数量与发展阶段

中国20世纪50年代对地貌科学开展了重点研究, 出版了由中国科学院自然区划工作委员会署名的《中国地貌区划(初稿)》论著^[2-3], 其后至20世纪70、80年代的研究状况, 由沈玉昌和李吉均等做了全面总结^[4-5]。论文是反映学科发展成果与发展水平的重要标尺, 是评价学科发展动态的重要指标。对1978-2015年地貌学中文学术文章的统计表明

收稿日期: 2016-12-13; 修订日期: 2017-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571388, 41171332); 测绘地理信息公益性行业科研专项(201512033); 资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新项目(O88RAA04YA) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41471388, No.41171332; Surveying and Mapping Geoinformation Nonprofit Specific Project, No.201512033; Innovation Project of LREIS, No.O88RAA04YA]

作者简介: 程维明(1973-), 男, 甘肃天水人, 博士, 研究员, 主要从事地貌学与GIS研究。E-mail: chengwm@lreis.ac.cn

755-775 页

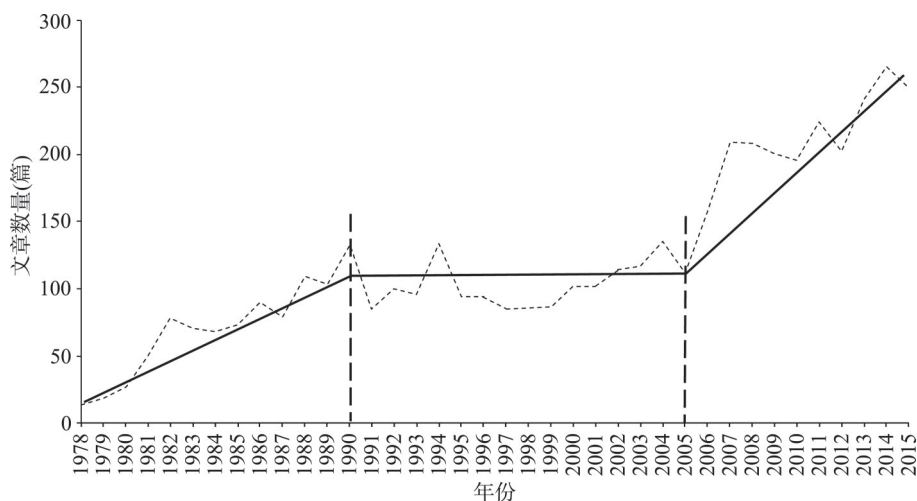


图1 1978-2015地貌相关中文文章发表数目变化

Fig. 1 Curve change of paper numbers published in Chinese journals about geomorphology researches over the past 40 years

(图1), 期间共发表论文4700余篇, 按发表时间大致可分为3个发展期段: 1978-1990年为快速发展期段, 共发表1042篇, 年均发表文章数以6.5篇/年的速度递增; 1991-2005年为平稳发展沉淀期段, 处于学术沉淀, 蓄势待发状态, 共发表1497篇, 年均发表论文110篇左右; 2006年至今为高速发展期段, 共发表2161篇, 年均发表文章数以8.9篇/年的速度递增, 2015年发表论文达到245篇。

1.2 论文内容递变情况

学术成果是衡量学科发展水平与应用能力的重要标尺。地貌学是国土建设与国防建设的重要依托, 在服务国家建设需求上, 40年来地貌学做出了重要贡献。成果内容具如下特色。

1.2.1 研究理论不断创新, 学术水平大幅度提高 中国地貌学研究在近40年间, 尤其是进入21世纪以来, 及时吸纳了新的科研成果, 提升了研究理论, 学术水平有了大幅度提高。在揭示地貌形态发生机制方面, 40年前普遍采用地质动力学构造地台与地槽论解析平原、高原与山地的形成与演替^[6], 但其发生的动因机制问题却一直难于揭示。20世纪末, 地学地壳板块理论获得重大突破, 地貌形成的板块构造机制逐步完善。地学工作者将这些理论应用到地貌发生分异上, 解析了地貌形态发生分异的内营力问题, 从机理上回答了地表地貌形态特征与地球深层地壳板块构造活动的联动机制, 是地貌学研究史上的一场革命, 意义重大^[7]。

1.2.2 研究领域不断拓宽, 内容从传统地貌研究拓展到地貌—自然地理综合研究, 深化了地貌学理论研究的广度与深度 以地貌为基础, 现今开展的地貌与土地利用、地貌与植被覆盖、地貌与水文关系、地貌与土壤发生分类等综合交叉研究成果众多, 如不同地貌类型区植被覆盖变化研究^[8]、地形对降水影响研究^[9]、基于生态背景下泥石流预报研究^[10]、长江口潮滩沉积物有机微污染物分布特征研究^[11]、西南喀斯特山地石漠化与地貌、岩性、降水及人口密度的关系^[12]等, 都是研究内容大为拓展、研究深度不断深化的体现。不仅限于地球, 地貌研究亦开始对月球表面形态、月球撞击坑分类及其空间分布、月球演化等展开研究^[13], 同时开展了火星是否具备形成风沙地貌条件的探索^[14]。

1.2.3 学科体系日益完善, 已成为一门完整的学科 是否具有完整学科体系是衡量某一学科是否成熟的重要标志。地貌学经过半个多世纪的发展, 已在地表形态形成机制、地貌

分类、地貌区划、以及地貌应用功能、地貌研究方法与技术等方面取得诸多进展,已发展成为一门独立成熟的学科。

地貌分类日趋成熟。在有关地貌类型划分原则上,曾长期存在成因分类和形态分类之争。20世纪50年代,中国对地貌科学开展了重点研究,出版了由中国科学院自然区划工作委员会署名的《中国地貌区划(初稿)》论著^[1],提出地貌类型划分应主要依据成因原则进行分类,特别注明不采用形态分类原则。该研究按宏观地质构造和新构造运动体系,将中国山地划分出极高山、高山、中山、低山和丘陵等类型,而在较小的地貌形态成因单元划分出冲积洪积平原、湖积平原、喀斯特峰林等类型。从这一类型体系上看,划分原则存在形态与成因割裂,高级类型按地质构造、低级类型按地表外营力,导致划分原则极不协调;划分指标上只在山地按高程差异划分,而对平原则没有指标,说明指标体系还不完备。上述状况说明,当时的地貌学分类仍处在探索与不成熟阶段。中国地貌学家沈玉昌、周廷儒、任美镔、施雅风、陈述彭等,在各自的论著中,有的采用形态划分,有的采用成因划分^[2-4]。按形态划分的著作中,李炳元等于2013年在《地理学报》发表的“中国地貌区划新论”最具代表^[15]。该方案采用地表形态特征将地表划分出平原、台地、丘陵、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地、极大起伏山地7大类,再按5级海拔高度指标划分出28个基本地貌类型。这一分类方案的优点是继承了视角上传统地貌特征,创新推出了起伏度的山地划分指标。然而在原则与指标上,同样存在不足,表现在:①未考虑成因对地貌形态的影响与作用;②在分类指标中引入低海拔(<1000 m)、中海拔(1000~2000 m)、高中海拔(2000~4000 m)、高海拔(4000~6000 m)、极高海拔(≥ 6000 m)5种海拔类型,势必形成平原、台地、丘陵、低山、中山、高山各增加5个类型,使分类体系趋于复杂。近年来,采用形态与成因相统一的原则进行地貌类型的划分已在学术界获得共识,大大促进了地貌学理论的提高和应用效能的发挥。国家“十三·五”(2016-2020)发展规划中,中国地理国情普查、中国山洪灾害调查与评估、中国城市山洪灾害研究、中国陆地地形跨省界自然地理实体普查等项目,其基础对象均为地形与地貌特征,均采用地表形态与地貌成因相统一的原则进行地貌类型的划分与地貌区划的构建,这是地貌科学研究上的一大进步。

地貌区划日趋完善,分支学科区划不断涌现。中国地貌类型复杂多样,区域分布格局差异较大,使全国性地貌区划方案相差甚远,经过多年努力,区划结果逐渐走向一致。中国20世纪50年代完成的地貌区划(初稿)^[1],是中国第一部覆盖全部陆域系统的区划,采用成因原则将全国陆域划分出18个一级区(大区),44个二级区(地区),114个三级区(地貌省),未作第四级(小区)的划分。该区划收集的区域资料翔实,是中国集全国地貌学研究者智慧的第一部大型专著,与全国1:400万地貌类型图相配套、有面积表达、区划空间界线较为正确。但因研究基础薄弱、研究时段短,存在一些不足:①该方案以构造成为主导原则进行区划单位的构建,未能充分反映中国地貌形成发生发展的规律;②说明中提到大地构造的原则,而第一级区域却未考虑中国陆域地貌的三级台阶地势格局,难于回答构造体系对中国地貌格局的制约与影响,第一级大区出现18个单位的冗多局面;③区划指标不具体,笼统提出按大地构造、地表形态和外力作用,而无具体指标和指标分级;④区划体系不完整,第三级区划单元有许多空缺。其后有不少区划版本,最具代表性的为李炳元等按形态分区的版本“中国地貌区划新论”^[15]。该方案的优点是:①采用地貌类型区域组合转换原理进行地貌分区,创新了中国地貌区划理论由地貌类型转换为地貌区划的实践研究;②考虑了中国陆域三级地貌阶梯之间的明显差异,划分出第一级地貌大区为6个,其下按地貌类型组合划分出二级区37个,并有附图

和面积。近年来,围绕地貌区划理论完善与提高应用能力的研讨不断深入,国家“十二·五”和“十三·五”规划,都有不少项目包含了地貌区划的任务,坚持形态与成因结合,服务于生态区划与规划、生态评价与生态建设、地貌灾害预报与预防、交通线路选址与桥涵地基稳定性、城乡洪涝地貌分析、自然保护区地貌功能区划等项目,都要求从地貌综合角度提交相应成果。如应“地理国情普查”国家专项任务的需求,中国科学院地理科学与资源研究所正在联合国内多家科研院校,开展全国1:25万尺度的五级地貌分区的研究工作,该项成果将对中国的地貌分区划分提供最详细的区划方案。同时,中国生态地理区划^[16]、中国沙漠戈壁生态地理区划^[17]、中国戈壁综合自然区划^[18]等均是地貌区划的最新成果,在地貌分级体系、指标体系、分级特征、制图与新技术应用上有严格界定,标志着中国地貌区划已日趋完善,分支学科区划也不断涌现的局面已经出现。

1.2.4 研究队伍不断壮大,已具备开展大科研的能力 中国学者对地貌学的研究,也许最早的就属黄秉维1934-1935年在翁文灏、丁文江指导下进行的“山东海岸地形”研究^[19],李四光1939年在其著作“中国地质学”中将中国划分为19个区^[20]。直到1954年中国科学院地理研究所设立地貌研究室,地貌学研究才开始进入系统研究轨道,其后,1956年北京大学地质地理系、1958年南京大学地理系、西北大学地理系和华东师范大学地理系相继设立地貌专业,累计培养了大批地貌专业人才。与此同时,中国科学院广州地理研究所、长春地理研究所、华北地理研究所亦先后成立地貌研究室,对中国地貌科学重大问题开展研究^[20]。经统计,现今全国有地理研究所几十家,设立地理专业的大学院校近百所^[20],均有地貌专门人才从事研究与教学工作。

最新研究成果表明,中国地貌科学已初步形成了学科体系齐全,专业队伍构成较为配套,中青年人才培养速度加快,研发储备能力大幅提升局面,已具备了开展大科学研究活动的能力^[21]。如近期完成的“西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控”研究,对中国西南喀斯特地区石漠化时空格局、变化与驱动力、生物地球化学过程与成土速率、水循环动力过程及水文效应、植物群落与其生态适宜性等重大问题,均是在地貌综合研究基础上开展的。该项目从科学与实践上较正确地回答了(石漠化)发生机制、过程、速率及生态建设、灾害防治等系统综合科学问题,提出的对策措施对中国西南区域的生态环境建设具有重要指导意义。又如新近开展的“中国山洪灾害调查与评价”项目,也都是地貌学应用于中国灾害防治研究的重要体现。

1.2.5 研究方法与技术手段日趋先进,新技术研究体系已经形成 近年来,随着地理信息系统、遥感、全球定位等技术的飞速发展,人们开始基于航空相片、卫星影像以及数字高程模型等各种数据源研究提取地貌特征信息的方法,并在地貌类型界线的确定以及地貌渐变信息的表达等方面取得重要进展^[22-23]。中国国家测绘部门1:5万数字高程模型、2000年初美国实施的“航天飞机雷达地形测量计划”(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM, <http://srtm.csi.cgiar.org/>)获得全球60°N到56°S之间高精度高程格网数据、ASTER数据,为准确进行地貌特征提取提供了有力的支撑,为获取高精度大比例尺的典型地貌特征的DEM数据提取提供了良好基础。近年来,应用合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)和机载激光类型(LiDAR)等技术进行大比例尺地形测量、监测断层运动、地震区形变、火山喷发前的隆起、滑坡前的形变等地质灾害方面亦已得到广泛应用^[24]。

利用DEM和遥感影像等多源数据进行数字地貌信息定量提取已有大量研究成果。Miliaresis等基于高分辨率遥感影像、高精度DEM进行地貌特征分割、洪积扇地貌特征提取和地貌制图等^[25];Jordan等基于DEM、地质图、遥感影像及观测数据等多源信息进行

构造地貌特征提取^[26]; 汤国安在2014年发表的“中国数字高程模型与数字地形分析研究进展”一文中, 对DEM的数据模型、数字地形分析的不确定性、尺度效应、高性能计算方法以及地学应用等方面进行了全面的梳理和总结, 将数字地形分析研究思路和方法拓展到了其他地学场模型的研究中^[27]。

地貌遥感制图实现了新的突破。以遥感与GIS技术取代传统的手工编制与机械制图的局面已经实现, 新遥感制图技术体系已经形成。采用遥感影像等多源数据进行地貌类型的综合解析, 最终编制出版《中华人民共和国地貌图集(1:100万)》是这一体系的重要标志^[23]。该图自2004年开始, 在继承20世纪80年代编制出版的15幅1:100万地貌图(如北京幅、西安幅、太原幅等)、图例系统和“中国1:100万地貌图制图规范(1987)”^[28]基础上, 中国科学院地理科学与资源研究所联合国内相关院校, 对原百万分类系统进行了分层分级归并和扩充, 制定了新的中国1:100万数字地貌分类系统^[29-31], 采用形态和成因相结合的分层分级组合分类方法和点、线、多边形形态结构数据组织方式, 在地质、老地貌图、多尺度DEM等数据的支持下, 应用基于遥感影像等多源数据进行数字地貌综合解析的技术和方法, 完成了全国74幅百万标准分幅地貌类型的遥感解译, 构建了中国第一个百万数字地貌数据库系统, 编制出版了《中华人民共和国地貌图集(1:100万)》和《数字地貌遥感解析与制图》, 填补了该领域国内外空白。《中国1:100万数字地貌图研究及其应用》项目获2009年度国家科学技术进步奖二等奖。

2 地貌分支学科研究状况的回顾与展望

随着中国地貌学研究不断深入与应用需求的扩展, 地貌学分支学科获得了快速发展, 主要包括动力地貌学、气候地貌学、构造地貌学、应用地貌学。同时, 地貌学与邻近科学间相互渗透, 研究方法相互借鉴, 如河流动力、海岸动力、冰川动力、风沙动力等的相关原理和方法逐渐引入到地貌分支学科中; 古地理、古气候、沉积相、海面变化、新构造运动等的发展也丰富了古气候地貌及构造地貌的研究领域, 这些地貌的分支都开拓了研究领域。另外, 岩石地貌学, 如丹霞、花岗岩等的发展也取得诸多进展^[32]。

2.1 动力地貌学研究

按外营力作用方式和形成的地貌特征, 动力地貌主要包括: 冰川地貌、冰缘和冻土地貌、风沙地貌、黄土地貌、岩溶(喀斯特)地貌、河流地貌、海岸及海底地貌等。

2.1.1 冰川地貌研究 中国冰川地貌主要发育于青藏高原高山区与天山、阿尔泰山极高山带上。1949年前对冰川的研究几乎为空白, 直至20世纪50年代, 对玉龙山、贡嘎山的冰川考察为起步, 逐渐将研究区域扩展至整个青藏高原与天山、阿尔泰山。中国冰川与地球南北两极的冰川差别主要体现在冰期历史短与冰川发育具有阶段性上^[33-35]。中国地貌学者研究的重点一直集中在中国冰川发育空间、成因与发育时段等方面。目前, 中国已有完整的冰川名录, 冰川科学已取得了突破性的学术进展^[36-39]。而近几年, 冰川地貌的研究逐步扩展到天山、西秦岭、帕米尔等山地的冰川地貌研究上^[40-42]; 对多年来中国东部山地(如庐山、浙东四明山等)是否存在第四纪冰期遗迹的问题, 不少学者也做了探讨, 证实所谓的“第四纪冰川遗迹”主要是由风化、重力、流水作用形成的地貌形态而非冰川遗迹^[43-44]。

2.1.2 冰缘(冻土)地貌研究 冰缘(冻土)地貌广泛分布于气候严寒地区, 与冰川作用有一定关系, 但在无冰川作用而具有寒冻作用区域也广泛存在, 其特点是地表具有冻结与融化交替过程。长久以来中国地貌工作者从未停止过对冰缘地貌的探索, 但前期研究大

多集中于冰缘地貌特征、分布和信息提取等方面^[45-47],而对冰缘地貌区的植被、土壤、水文、微地貌等方面的研究相对较少。近年对青藏高原、秦岭、五台山、小兴安岭、辽东山地冰缘地貌的研究表明^[48-52],冰缘地貌可进一步划分出石河、石流坡、石海、石堡、雪蚀洼地、跳石塘等类型,在地表径流的作用下,上述类型具有潜在的移动性;冰缘地貌上已初步具有耐寒植物的生长条件,且群落分布亦具分异,石流坡上的灌木多于石海,而草本种类则石海多于石流坡,从冰缘地貌上部至下部,植物种类也具有由简单群落至复杂群落的转换趋势;土壤在冰缘地貌上亦开始发育,成壤作用及土壤有机质具有从上坡向下坡增强增多趋势;在成灾成因上,跳石塘坡度较陡,稳定性较差,石块容易滚动下滑造成灾害。展望未来,将冰缘地貌学与植物学、土壤学、水文学等相关学科相结合,形成冰缘地貌学综合研究体系已成为该分支学科未来的重要研究方向。

2.1.3 风沙(风成)地貌研究 风沙地貌广泛分布于中国西北干旱、半干旱,甚至部分半湿润区域,是由风力作用形成的一种地貌类型,其形成、形态、空间组合、演变均与风力作用有关^[53-55]。20世纪50年代中国科学院组织沙漠综合考察队,60年代成立中国科学院沙漠研究所,其后,研究机构不断扩充,研究深度与广度不断扩展,目前已建成涵盖各个领域的完整学科体系与优秀研究团队。发展历程上,20世纪50-60年代主要开展沙漠考察,进行沙漠分类与总结群众防沙治沙经验等;60-90年代则主要在风沙移动规律、沙漠化发展动态与科学防治上;90年代后,可持续发展理念融入沙漠研究领域,在各沙区广泛建立沙漠实验站,深入开展沙漠发生发展与区域气候、沙区植物与生态群落、沙区节水农业、沙区生态防护林体系建设、沙区特色资源与特色产业(沙产业)、沙区生态资源与沙漠GIS建设等研究,将中国沙漠研究水平推向世界前列^[56-58],对特定沙区、特定内容的风沙地貌研究也不断深入,成果突出,如库姆塔格沙漠羽毛状沙丘风力系统研究、巴丹吉林沙漠沙山形成与沙山微地貌、沙丘湖泊水文动态研究,古尔班通古特沙漠风能的研究等^[59-62]。在沙漠地貌制图方面,腾格里沙漠等地貌图的编制和出版,详细揭示了我国沙漠地貌的空间分布格局和变化规律^[63]。

2.1.4 黄土地貌研究 中国对黄土地貌(主要指黄土高原区)研究由来已久,对黄土区域界定与科学成果的荟萃起始于20世纪50年代,由中国科学院成立黄河中游水土保持综合考察队开始,以及80年代开展“黄土高原地区综合治理开发”项目和其后建立的诸多生态建设实验基地^[64-65],对黄土地貌的研究包括黄土成因、黄土侵蚀及水土流失、黄土地貌精细刻画等几个方面。

研究表明,黄土高原形成主要起源于风力堆积^[66]。新第三纪末(距今240万年前),中国季风气候开始形成,西北地区开始干旱化,西北向干风吹力作用逐渐加强。南面有秦岭阻隔,尘沙开始在本区大量堆积。距今110万年至60万年(第四纪早、中更新世),沙尘堆积达到旺期,平均堆积厚度达到100~200 m,黄土高原面貌由此确立^[67]。随后,水力侵蚀逐渐加强,侵蚀大于堆积,黄土沟壑地貌由此形成^[68]。

在黄土的侵蚀和水土流失研究方面,研究表明,黄河流域现代土壤侵蚀面积有45.4万km²,多年平均侵蚀量16亿t/a,自然侵蚀量为9.76亿t/a^[69]。20世纪90年代始,生态建设成就显著,水土流失量下降,土壤侵蚀维持在11亿~12亿t/a的水平^[70-71]。进入21世纪,在退耕还林还草等生态建设措施下,土壤侵蚀量显著减少,黄河年输沙量大致维持在6亿~7亿t/a,区域总侵蚀量大致在10亿t/a水平。为防治水土流失,经过多年努力提出了径流控制^[72]及缓坡梯田及缓坡地^[73-74]的方式,大大降低了黄土地貌区的水土流失状况。

近10年来,对黄土地形进行精细化研究取得诸多成果。利用分形技术进行河网分形维数和稳定性系数计算,认为以分形参数进行定量地貌特征研究具有较好的可行性^[75];

结合DEM数据,对不同地貌形态类型的植被覆盖、土地利用、滑坡频率等的空间变异性进行了探索^[76-78];对黄土高原地貌提取方面亦做了一定的实验^[79-82],对通过边缘检测算子生成沟沿线的方法进行了讨论^[83],为解决正负地形在分割时产生大量多边形碎屑问题,采用区域生长法来改进坡面畸变问题也开展了研究^[84];利用多方位DEM地形晕渲、坡度等多元指标,以主成分分析消除多重共线性和约减维数,并以Logistic回归模型提取黄土高原正、负地形的的方法也取得良好进展^[85]。

2.1.5 岩溶(喀斯特)地貌研究 中国是喀斯特地貌广泛分布的国家,在西南诸省分布尤其集中。20世纪50-60年代,对喀斯特地貌的研究主要集中于类型方面^[86],70-80年代进一步开展喀斯特溶洞、溶盆及发育演化规律的研究,90年代后,逐渐跨入喀斯特水环境、生态地貌分类分区研究^[5, 87]。近10年来,针对石漠化生态修复与建设等问题,深入开展了土壤侵蚀特征、小流域生态恢复、SAR影响配准及石漠化岩性、土地利用关系等方面的研究^[88-92]。为探索喀斯特地区侵蚀模数与侵蚀因子的相关关系,开展了不同坡度条件下土壤侵蚀模数的多因子方程筛选回归模型研究,提高了缓坡、陡坡侵蚀产沙预测精度^[93-95]。

2.1.6 河流地貌研究 中国对河流地貌的研究历史悠久,20世纪50年代开始就有系统性研究,大致是50-60年代开始,先后开展过长江、黄河、黑龙江、汉江、湘江、沁河、雅鲁藏布江等河谷地貌研究。其后陆续对河床、河型及演变规律进行了研究,加深了河流地貌研究的深度^[4, 96];至70年代,河流地貌拓展到河源地貌研究。针对长江、黄河发源地资料空白状况,组织实地考察,明确了长江发源于唐古拉山脉主峰各拉丹冬雪山,黄河发源地的正源为卡日曲。20世纪80-90年代,河流地貌研究拓展到河床演变规律研究上,提出了新河型分类方案及其形成条件^[97]。进入21世纪,研究拓展到河床结构与河流地貌演变机理,河道系统与流域侵蚀产沙相互关系及河道平衡机理的研究^[98-99],对河口水文动力与泥沙堆积的研究亦在长江口开展,为探索河口演变规律积累了资料^[100-101]。许炯心在2016年总结了我国河流地貌的研究进展,以此纪念中国现代河流地貌学研究的开拓者和奠基人——沈玉昌先生诞辰100年,包括水系发育与河谷地貌演变、侵蚀与产沙过程、河床过程与河型、河流地貌系统研究^[102],这些成果代表了中国河流地貌学研究的最新及最前沿进展。

2.1.7 海岸及海底地貌研究 中国对海岸地貌的研究开展较早,20世纪50-60年代,全面开展了海岸线调查,查清了中国海岸线长度。其后对黄海与东海重要海域的海底地貌类型与成因,以及东海、南海海底沉积物进行了研究,为中国开展海岸地貌研究打下了良好基础^[103]。在全球气候变暖与海平面上升背景下,中国海岸地貌学家从20世纪80年代开始,依据地面沉降、海面升降的趋势,预测了黄河、长江、珠江三角洲至2030年海平面上升量,这是中国首次对海岸河口动态研究取得的成果^[104]。与此同时,还开展了上述三角洲沿岸泥沙运动规律与形成过程、演变规律、海岸潮滩类型及其动态变化的研究,为港口建设、河口治理、航道整治提供科学依据^[105]。进入21世纪,对海岸—海洋的关注度倍增,中国海岸地貌研究亦得到很大发展。海岸类型、成因与演变、渤海、黄海、东海、南海大陆架、海岛与岛礁分布与规模、浅海水文与潮汐、海洋生物与生态系统、海洋气象与气候、海岸线区划、海岸与港湾建设等相关海岸地貌的内容已全面开展研究,中国海岸地貌研究的深度与广度,以及新技术新方法的应用等将进入快速全面的发展期^[4, 106-108]。在海底地貌研究方面,郑勇玲等在分析海底地貌学国内外研究现状基础上,综述了中国海底地貌的最新研究进展和发展历程,探讨了今后中国近海地貌的研究发展方向,随着测量技术的不断更新,中国海底地貌研究将由宏观向微观、从大的地貌到特定的地貌、从形态特征到地貌过程、人类活动对地貌过程的响应研究等将会不断深入^[109]。

2.2 构造地貌学研究

构造地貌是指受构造内动力作用控制,通过内外地质动力的相互作用所确定的能够反映一定构造特征的地貌形式。构造地貌学的研究内容包括:地貌与构造的关系、构造地貌发生和发展过程以及构造地貌过程所揭示的地球内部构造动力过程。近几十年来,构造地貌在大地构造地貌、地质构造地貌、火山及熔岩地貌等方面都取得诸多进展。

2.2.1 大地构造地貌研究 20世纪末,地貌学家及时吸纳了地质板块学说理论^[7],认为地球圈层具有内核—地幔—地壳结构,地幔层具有暖流层,并产生热对流循环。板块学说认为,地球外层地壳刚性岩石圈存在大小不等的板块(陆块),板块与板块接触带上受上地幔暖流热对流作用会产生陆块运动,陆块接触带岩体受冲击会褶皱成山,而板块块体本身相对稳定,地表形态表现为平原或高原。板块相对移动而发生彼此碰撞或张裂,形成了地球表面的基本面貌。在板块张裂的地区常形成裂谷或海洋,在板块相撞挤压的地区常形成海沟、岛弧、海岩山脉及巨大的山脉。地球上海陆的形成和分布、陆地上大规模的山系、高原和平原的地貌格局都是地壳板块运动的结果^[7, 110]。

在中国大地构造地貌研究方面,中国诸多学者进行了大量研究,阐述中国地貌四级台阶的空间格局^[2-3, 6]。中国位于欧亚板块的东部,东南毗邻太平洋板块,西南接印度板块,三大板块的演化及其相对运动,形成并制约着中生代以来中国地貌的分布特征,也深刻影响着中国地貌的形成、演变、展布和区域组合^[2-3, 6]。在大地构造地貌制图研究方面,最有代表性的成果为陈志明2011年主编出版的《亚洲与邻区陆海地貌全图(1:8000000)》,其制图区覆盖了地球表面约35%的陆海地貌,采用较小比例尺的专题地图来表现板块造貌构造的近代要素,为近年来大地构造地貌制图的经典之作^[111]。

2.2.2 地质构造地貌研究 近几十年来,学者们在中国一些构造活跃地区所开展的地质构造地貌学研究方面取得诸多成果,比较典型的研究如青藏高原及周边地区的层状地貌格局与高原隆升的关系^[112]、鄂尔多斯周边地堑盆地地区的地貌特征及演化历史。这些研究分析了新构造活动的方式、速率、历史变化、应力场和动力机制及其对各种地貌类型形成和演变的影响或控制作用等^[113]。

地质构造地貌的分析方法可归纳为构造地貌格局分析法、构造地貌形态分析法、构造地貌相关沉积分析法和构造地貌年代分析法^[114-115]。基于河流阶地、山前洪积扇、冲沟等形变,通过高原夷平面的空间分布等揭示区域构造活动特点和历史^[112, 116]。近年来,随着GIS和RS技术的不断提升,多源的SRTM-DEM、ASTER-DEM数据被广泛应用到构造地貌研究中,基于流域单位获取如地形起伏度、面积—高程积分、河长坡降度、分形维数、盆地形状指数、流域盆地不对称度、谷底宽度与谷肩高度的比值等地形指标,综合分析区域地质构造的相对稳定性^[117]。可以预见,构造地貌学将在圈层作用研究中发挥重要作用,同时朝着信息化、量化的方向发展。

2.2.3 火山与熔岩地貌研究 受区域地质构造的影响,中国的火山熔岩地貌分布大致可分为两个区域,一是沿中国东部大陆边缘,形成数以百计的火山群和火山锥,成为环太平洋火山链的一部分;二是位于青藏高原及其周边地区的火山群,刘嘉麒于1999年系统地总结了中国的火山地貌分布情况,论述了中国火山活动历史及地质特征^[118]。近年来,GIS技术被应用到火山熔岩地貌,为精细和定量刻画火山地貌提供了方法支撑。

2.3 气候地貌学研究

任何地貌都时时刻刻受到气候条件的控制和制约,故气候地貌主要研究不同气候条件下外力作用与外力组合的特征以及所形成的地貌组合。气候地貌的分带性和地带性一直是该学科的主要研究内容。如在青藏高原及其周边的高寒冰川区域分异上,通过对山

地冰川地貌与气候变迁的耦合研究,表明中国冰川地貌形成与发育区域分异明显,青藏高原西部山地冰期形成时间早,冰川地貌发育完整,冰川规模随渐新世以来的气温升高而渐行缩小;而东部区域的山地冰川形成时间短,规模较小,且仅在局域山脊保留有末次冰期发育的冰川;研究还表明,影响冰川发育的因素不仅仅是区域气候,构造因素也起着相当重要的作用^[119-122]。此外,在冻土地貌、干燥地貌等研究领域也做了相应的研究。

2.4 古地貌研究

近年来,中国对古地貌的研究有较大进展。一是在探索地貌演化方面,通过地貌演化模拟反演古地貌形态,并探讨导致地貌改变的动力因素方面取得多项成果^[123-126],二是在古地理环境方面获得重要进展。如北京广安门内广义大厦工程通过地层剖面进行的古地貌复原研究,认为2万年来该区地貌形态变化与植被变化有重要关联,该区环境经历了晚更新世晚期较冷湿的疏林草地、较干旱的草原植被、全新世较暖湿的疏林草地及较凉湿的草甸植被的演变过程^[127]。此项研究对今后开展古地貌与古环境变化研究有重要意义。又如依据汾渭地堑系列湖盆地貌与沉积特征的研究,证明第四纪中晚期,各湖盆曾发生过数次大幅快速的湖泊消退与河流下切事件,规模从渭河盆地至临汾太原盆地直至大同阳原盆地,但各盆地在发生时序上亦存在差异^[128]。应用古地貌研究成果于油藏探索的研究也有所开展。如应用印模法、综合地质法等方法恢复王洼子地区和陇东地区侏罗纪古地貌,分析其油藏发生条件,发现油藏主要分布于紧邻高地斜坡及古谷坡等地势相对较高地带^[129-131]。研究方法上,古地貌复原综合模型研究也逐步开展,近期建立的综合地质模型,在复原古地形地貌综合特征、古气候变化^[132]等方面进行了有益的探讨。

2.5 岩石地貌研究

岩石地貌学主要研究同类岩石在不同自然地理条件下,或各类岩石在相同的自然地理条件下的地貌形态特征及其演化的学科。同类岩石的地貌形态特征及其演化在不同的自然地理条件下是极不相同的。如花岗岩在华南多呈高耸的山形,在华北,东北等地则多呈低矮的丘陵,这是因为岩相不同岩性各异的花岗岩在不同自然条件中因风化类型特性(例如有的以物理风化为主,有的以化学风化为主)的不同造成的。中国常见的岩石地貌有:石灰岩地貌、红色砂砾岩地貌(丹霞地貌)、石英岩地貌、页岩地貌、花岗岩地貌、玄武岩地貌、黄土地貌以及红土地貌等等。因喀斯特和黄土地貌在动力地貌部分已论述,这里就丹霞地貌、花岗岩地貌和流纹岩地貌的进展进行分析。

2.5.1 丹霞地貌研究 2010年,“中国丹霞”成功申报世界自然遗产,丹霞地貌作为一个地貌类型名称已被世界所承认,国内学者对于丹霞地貌的研究也日渐增多。近年来,科技部资助丹霞地貌基础数据调查、考察范围和深度不断加强,西藏等地区也陆续发现了丹霞地貌的分布,填补了之前部分省市对丹霞地貌基础数据的空白,推动了对丹霞地貌分布、分类、分区与自然景观、文化景观依存关系等方面的研究^[133-135],运用丹霞地貌定量计算公式分析了丹霞地貌背景和景观特征^[136-138],讨论了崆峒山丹霞地貌发育问题等^[139]。

2.5.2 花岗岩及流纹岩等地貌研究 在中国南方亚热带季风气候条件下,自中、上新世以来的夷平面及其深厚的花岗岩风化壳在后期不同程度构造抬升一下切过程中,形成许多中国特有的花岗岩地貌类型,如黄山和三清山等地的花岗岩峰林、石林、造型石、风动石等^[140-141]。研究表明,中国花岗岩地貌随不同气候区有明显的地带性规律,特别是纬度地带性,认为花岗岩地貌发育年代与中、上新世广布的夷平面存在密切关系。推算出不同山地的抬升幅度,沿海抬升约200 m,向内地逐渐增大,到南岭或大别山、伏牛山则达到约1600~2000 m^[140-141]。

最典型的流纹岩地貌主要分布在浙东雁荡山区,研究表明:区域流纹岩地貌景观可分为剥蚀崩塌型和河谷流水型2个大类,6个亚类,16个类型单元。受区域断裂构造的控制,区内沟谷和岩嶂在平面上的发育延伸主要沿NE、NW和EW 3个方向;在新构造运动和岩性差异的控制下,区内峰、嶂、瀑在垂向上的分布具有分带性^[142]。这些研究为揭示中国东部地区区域地貌演化具有重要意义。

2.6 其他地貌研究

重力地貌包括崩塌、滑坡等。近年来,随着中国生态与环境的改变,对山区重力地貌的研究越来越重视,从滑坡灾害分区规划图、滑坡危险程度分区图等研究逐渐增多。将数学模型引入到泥石流危险性评价的研究中来,使得泥石流危险度的划分方法更加合理,更加客观;采用地形地貌、地层岩性、降雨和人为因素等评价指标,采用灰色关联分析方法、主成分分析和模糊均值聚类方法进行区域和流域滑坡危险性评价等^[78, 143],这些研究可为区域及流域综合治理提供依据。

随着人类对自然的不断改造,人类活动已成为现代地貌过程的第三造貌力,人工地貌是人类造貌营力在自然地理背景下与自然营力协同作用塑造的具有人文特征的地貌体。李加林等2015年提出了人工地貌学,对人工地貌营力与地貌进行了分类,分析了人工地貌的变迁、人工地貌演化的影响机制、人工地貌的地图表达、人工地貌的环境影响等方面,并展望了人工地貌学的未来发展方向。他指出未来人工地貌学的研究需加强人工地貌学学科体系建设、人工地貌的物质构成与形态特征、人工地貌空间扩张过程及其发育规律、人工地貌的区域差异及累积地貌环境效应、人工地貌环境管理及国际比较等研究^[144]。

3 未来展望

近40年间,中国地貌学在学科建设及服务国家社会经济发展上做出了重要贡献^[145-146],但因中国是地貌大国,在揭示地貌形成发生及分异规律,服务国家生态环境建设、资源合理开发与布局、防灾减灾及社会经济可持续地貌保障体系构建上,仍有许多重大科学问题有待研究和破解。21世纪是人类管理地球获得重大突破的世纪,以地表形态为主要研究对象的地貌学,未来应着重在下列方面开展研究并有所突破。

3.1 加强地貌基础理论研究,模拟地貌形成发生演替规律,实现地形变异的预判

现代地貌是古地形的延续,而未来地貌形态的格局则源于现代地形的演替,揭示和解析这种演替规律的任务只能求助于基础理论的研究。目前关于地貌形态的形成与分异、形态特征与地理景观、地貌过程与地表物质结构、类型结构与地域组合,地貌学科体系构建等全局性与实践性等许多重要问题都等待基础理论研究来解析。应用现代科学思维与已有实践资料,采用遥感与GIS等先进技术,构建地貌识别系统,模拟地貌形成与演替过程,并实现地形变异的预判,为提高地貌学科管理水平提供决策依据,应是未来地貌学研究的重要方向之一。

3.2 加强地貌与地理分支学科的交叉研究,拓展地貌学研究空间,发展综合地貌学

地貌是地球表层人类活动的基本空间,是地表生物、动物、水文、土壤、气候、土地利用的载体,只要地貌形态发生改变,地表环境、资源与人类活动的基本层面便发生改变。因此,以地貌为基础,开展地貌与环境、地貌与资源、地貌与灾害、地貌与人类、地貌与旅游、地貌与土地利用等多样性地貌功能研究,拓展地貌研究空间,构建地貌学综合发展体系,是未来地貌学研究的重要方向。

3.3 开展地貌结构及其功能研究,提高地貌学研究水平,增强地貌学应用能力

地表形态类型、区域组合及其数量构成,空间排列组合特征,被视为地貌结构。在与人类活动关系互动上,地貌具有众多功能。如地貌形态与土地利用、地貌形态与生态系统、地貌形态与地方气候、地貌形态与地表水文、地貌形态与土壤、地貌形态与旅游、地貌形态与交通、地貌形态与城市建设、地貌形态与港口建设、地貌形态与地质灾害、地貌形态与洪涝灾害等等,无不受地貌形态结构的制约与影响,功能均受制于结构。因此,建立生态地貌学、资源地貌学、灾害地貌学、工程地貌学、旅游地貌学、城市地貌学、建筑地貌学、交通地貌学、管理地貌学成为深化地貌学研究水平的重要方向与途径。可见,构建地貌结构及其功能理论实践体系,是深化地貌学研究水平,提高地貌学服务于国家生态、经济、社会可持续建设能力的必然选择,必将成为未来地貌学发展的重要方向。

3.4 构建资源环境地貌信息系统,搭建资源环境共享平台,实现地貌智能化信息产业提升

采用先进技术方法与途径进行地貌系统的全息研究,是实现地貌强国目标的必然选择。首先要应用RS技术与地理实践,建立能获取地貌实体全息资料的技术,包括地理坐标方位、地形与覆盖体全息特征、地表利用现状特征等全要素信息的技术手段;建立地貌系统的资源环境空间与数量数据库,满足不同功能要求,不同尺度水平的地貌信息库;开发自动提取各类地貌数据与具有目标分析功能的计算机识别分析系统,实现全能的分析、处理、输出功能;形成具有预研需求的智能化地貌体系,全面提高自动化研究水平,实现地貌智能化信息产业的提升。

3.5 加强海岸地貌与海洋地貌研究,掌握海岸与海洋资源与环境全息信息,实现海洋大向海洋强国的转变

中国有黄海、东海、南海及内水渤海,还有与越南互邻的北部湾,海岸线长1.8万km,海峡有台湾海峡与琼州海峡,是一个拥有广阔海洋面积和海岸线的海洋大国。建立海洋环境与资源利用协调发展的海洋强国,应是中国的基本国策。21世纪是海洋科学获得重大突破的世纪,面对中国海洋科研相对落后现状,中国地貌科学工作者应该着重开展如下工作:①开展近海地貌类型与近海沉积特征的研究,掌握中国大陆架基本构架与沉积环境,为国家海洋权益维护与港口建设提供科学依据;开展地貌与近海环境,包括海洋气象、海洋水文、海洋生物、海洋污染等的调查观测与定位观测站的建设,为海洋环境的保护与海洋生态可持续管理提供决策依据;开展海洋资源的地貌调查与分析,包括藏油气资源地质地貌环境、油气资源类型、数量与藏油气地层,矿产资源类型与分布、海底沉积环境与沉积矿藏分布、海洋潮汐能的分异与可开发研究等;②开展远海海洋与深海地貌资源与环境预研究。远期,也即21世纪后半叶,开展海洋全息地貌,包括海洋山地、平原、海沟组成的海洋地貌、典型海域的海洋构造地貌;海洋境域地貌区域结构与分异(海洋地貌区划);海洋环境地貌,包括海洋洋流地貌、海洋温度分异、海洋生物(动物、植物、微生物与海洋自然区划);海洋资源地貌,包括油、气田形成发生的地貌特征与分布、海洋矿藏类型与分布、海洋鱼类、鲸类、贝类生物资源的分异与生物量等;海洋潮汐能数量巨大,是未来人类能源的重要利用对象,21世纪人类利用潮汐能也许会进入试行阶段,亦会是21世纪远期海洋地貌的重要研究方向。

3.6 加强人才培养和学术团队建设,建设可持续发展人才培养体系,保障地貌研究强国的逐步实现

地形地貌作为国家生存发展的基本国土与载体,必须用科学的思维与科学的方法进行管理,这就要求要有相应地貌专业人才参与其中。依据国家发展需求,中国对地貌

学研究人才的需求会不断扩大,对专业团队的需求也会与日俱增,培养人才与团队研发能力,应该是中国未来地貌学发展重要方向。

人才培养上应以培养高素质专业人才为目标。首先应完善高等院校地理学院招生体系,培养具有地貌专业知识的地质人才,同时应进行地貌与环境各要素,地貌与资源、社会经济关联学科的传授,成为培育初级地貌专门人才与综合地貌人才的培养基地;科研单位与高等学府应把培养中高级地貌专业人才作为重要任务,将培养大量硕士、博士作为重要方向,培养人才实践中要特别强调实践能力与应用能力的扩展。地貌形态与特征依存于地表,不深入实际,不进行野外考察与实践,便不知地形分类及其形成机理,就无从揭示地貌与地理各要素相互作用的过程与结果。强调在实践中发展综合地貌学,应该是中国地貌学人才培养长期坚持的方向。

团队建设是实践地貌强国的基本方向与途径。面对中国疆域广阔与地形地貌复杂多样的国情,地貌学要面对的科学课题和解决途径必然是巨量和多方面的,必须组建强大的团队进行攻关、创新方能完成。可以根据中国地貌区域结构与科学问题,组建山地、海洋、平原湖沼、沙漠戈壁为对象的团队,青藏高原作为特殊地貌单元,还可单独组建高山团队。综合地貌在建设可持续发展地理系统上有独特功效,团队内加强地貌与自然地理、气象气候、水文水资源、生物地理、土壤地理的交叉研究,对提高地貌学开展生态建设、资源合理利用与自然灾害防治有重要作用,应是团队建设的重要任务。长期的科研实践证明,以中年骨干为主体,老中青相结合,是完成各项攻关课题与重大科学命题的最好形式,应是我们坚持的方向。

参考文献(References)

- [1] Zhou Chenghu. A Dictionary of Geomorphology. Beijing: China Water & Power Press, 2006. [周成虎. 地貌学辞典. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.]
- [2] Zhou Tingru, et al. A Draft for Topographic Regionalization of China. Beijing: Science Press, 1956. [周廷儒, 等. 中国地形区划草案. 北京: 科学出版社, 1956.]
- [3] Resource Zoning Committee of Chinese Academy of Sciences. Geomorphological Compartmentalization of China (the first draft). Beijing: Science Press, 1959. [中国科学院自然区划工作委员会. 中国地貌区划(初稿). 北京: 科学出版社, 1959.]
- [4] Sheng Yuchang. Thirty years in geomorphology in the People's Republic of China. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 35 (1): 1-13. [沈玉昌. 三十年来我国地貌学研究的进展. 地理学报, 1980, 35(1): 1-13.]
- [5] Li Jijun, Zhang Qingsong, Li Bingyuan. Main progress of geomorphology in China in the past fifteen years. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(Suppl.): 641-649. [李吉均, 张青松, 李炳元. 近 15 年中国地貌学的进展. 地理学报, 1994, 49(增刊): 641-649.]
- [6] The Editorial Committee of Chinese Physical Geography of the Chinese Academy of Sciences. *Physical Geography of China: Geomorphology*. Beijing: Science Press, 1980. [中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理·地貌. 北京: 科学出版社, 1980.]
- [7] Earth Science Development Strategy Research Group, Earth Science Division of Chinese Academy of Sciences. *Earth Science: A Review and Prospect at the Turn of the Century*. Jinan: Shandong Education Press, 2002. [中国科学院地学部“中国地球科学发展战略”研究组. 地球科学: 世纪之交的回顾与展望. 济南: 山东教育出版社, 2002.]
- [8] Liu Zhihong, Guo Weiling, Yang Qinke, et al. Vegetation cover changes and their relationship with rainfall in different physiognomy type areas of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1): 16-23. [刘志红, 郭伟玲, 杨勤科, 等. 近 20 年黄土高原不同地貌类型区植被覆盖变化及原因分析. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 16-23.]
- [9] Qian Huaisui, Li Mingxia. Orographic influence on precipitation in transitional zone between Qinling Mountain Range and Huang-Huai Plain. *Geographical Research*, 1992, 11(3): 84-88. [千怀遂, 李明霞. 秦岭—黄淮平原过渡带地形对降水的影响. 地理研究, 1992, 11(3): 84-88.]
- [10] Zhang Guoping. A preliminary study on prediction method of rainstorm debris flow in China based on eco-environment

- background evaluation and meteorological forecast//Land Change Science and Ecological Construction. Beijing: The Commercial Press, 2004: 612-626. [张国平. 基于生态环境背景评价与气象预报的中国暴雨泥石流预报方法研究初探//土地变化科学与生态建设. 北京: 商务印书馆, 2004: 612-626.]
- [11] Liu Min, Yang Yi, Xu Shiyuan, et al. Distribution and ecological risk assessment of organic micro-pollutants in the tidal flat surface sediments of the Yangtze Estuary//Land Cover Change and Its Environment Effects. Beijing: Planet Map Publishing House, 2002: 251-258. [刘敏, 杨毅, 许世远, 等. 长江口潮滩表层沉积物有机微污染物分布及其生态风险评价//土地覆被变化及其环境效应. 北京: 星球地图出版社, 2002: 251-258.]
- [12] Zhang Xinbao, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Relationships between the spatial distribution of karst land desertification and geomorphology, lithology, precipitation, and population density in Guizhou Province. *Earth and Environment*, 2013, 41(1): 1-6. [张信宝, 王世杰, 白晓永, 等. 贵州石漠化空间分布与喀斯特地貌、岩性、降水和人口密度的关系. *地球与环境*, 2013, 41(1): 1-6.]
- [13] Cheng Weiming, Wang Jiao, Zhou Chenghu. Analysis on research progress and tendency of Lunar Morphological characteristics. *Geographical Research*, 2014, 33(6): 1003-1014. [程维明, 王娇, 周成虎. 月表地貌特征研究进展及趋势分析. *地理研究*, 2014, 33(6): 1003-1014.]
- [14] Li Jiyan, Dong Zhibao. Research progress of aeolian landforms on Mars. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(4): 951-961. [李继彦, 董治宝. 火星风沙地貌研究进展. *中国沙漠*, 2016, 36(4): 951-961.]
- [15] Li Bingyuan, Pan Baotian, Cheng Weiming, et al. Research on geomorphological regionalization of China. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(3): 291-306. [李炳元, 潘保田, 程维明, 等. 中国地貌区划新论. *地理学报*, 2013, 68(3): 291-306.]
- [16] Zheng Du. A Study on the Eco-Geographic Regional System of China. Beijing: The Commercial Press, 2008. [郑度. 中国生态地理区域系统研究. 北京: 商务印书馆, 2008.]
- [17] Shen Yuancun, Wang Xiuhong. Eco-geographical zoning of desert and gobi in China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(1): 1-13. [申元村, 王秀红. 中国沙漠、戈壁生态地理区划研究. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(1): 1-13.]
- [18] Shen Yuancun, Wang Xiuhong, Cheng Weiming, et al. Integrated physical regionalization of stony deserts in China. *Progress in Geography*, 2016, 35(1): 57-66. [申元村, 王秀红, 程维明, 等. 中国戈壁综合自然区划研究. *地理科学进展*, 2016, 35(1): 57-66.]
- [19] Editing Group of Collections of Huang Bingwei. Sixty Years of Studies on Integrated Physical Geography: Collections of Huang Bingwei. Beijing: Science Press, 1993: 491-492. [黄秉维文集编辑小组. 自然地理综合工作六十年: 黄秉维文集. 北京: 科学出版社, 1993: 491-492.]
- [20] The Geographical Society of China. Chinese Geographers and Geographical Units Directory. Beijing: Xueyuan Publishing Company, 2006: 364-516. [中国地理学会. 中国地理学家及地理单位名录. 北京: 学苑出版社, 2006: 364-516.]
- [21] Cheng Weiming, Liu Qiangyi, Shen Yuancun. Research progress and effect of geomorphology based on projects supported by the National Natural Science Foundation of China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(7): 1255-1261. [程维明, 刘楠漪, 申元村. 国家自然科学基金项目资助的地貌学研究现状与效应. *地理学报*, 2016, 71(7): 1255-1261.]
- [22] Chen Shupeng, Zhao Shiyong. Geo-Analysis of Remote Sensing. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1990. [陈述彭, 赵英时. 遥感地学分析. 北京: 测绘出版社, 1990.]
- [23] Zhou Chenghu, Cheng Weiming, Qian Jinkai. Digital Geomorphological Interpretation and Mapping from Remote Sensing. Beijing: Science Press, 2009. [周成虎, 程维明, 钱金凯. 数字地貌遥感解析与制图. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [24] Shan Xinjian, Song Xiaoyu, Liu Jiahang, et al. Obtaining digital elevation data in different terrain and physiognomy regions with spaceborne InSAR and its application analysis. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(24): 2074-2079. [单新建, 宋晓宇, 柳稼航, 等. 星载 InSAR 技术在不同地形地貌区域的 DEM 提取及其应用评价. *科学通报*, 2001, 46(24): 2074-2079.]
- [25] Miliareis G Ch, Argialas D. Extraction and delineation of alluvial fans from digital elevation models and landsat thematic mapper images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, 66(9): 1093-1101.
- [26] Jordan G, Meijniger B M L, Hinsberg D J J V, et al. Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(3): 163-182.

- [27] Tang Guoan. Progress of DEM and digital terrain analysis in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1305-1325. [汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展. *地理学报*, 2014, 69(9): 1305-1325.]
- [28] Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. 1:1000000 Geomorphological Mapping Specification. Beijing: Science Press, 1987. [中国科学院地理研究所. 中国 1:100 万地貌图制图规范. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [29] Zhou Chenghu, Cheng Weiming, Qian Jinkai, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(6): 707-724. [周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究. *地球信息科学学报*, 2009, 11(6): 707-724.]
- [30] Zhou Chenghu, Cheng Weiming. Research and Compilation of the Geomorphological Atlas of the People's Republic of China. *Geographical Research*, 2010, 29(6): 970-979. [周成虎, 程维明. 《中华人民共和国地貌图集》的研究与编制. *地理研究*, 2010, 29(6): 970-979.]
- [31] The Editorial Committee of Geomorphologic Atlas of People's Republic of China. The Geomorphologic Atlas of People's Republic of China (1:1000000). Beijing: Science Press, 2009. [中华人民共和国地貌图集编辑委员会. 中华人民共和国地貌图集(1:100 万). 北京: 科学出版社, 2009.]
- [32] You Lianyuan, Yang Jingchun. *Geomorphology in China*. Beijing: Science Press, 2013. [尤联元, 杨景春. 中国地貌. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [33] Cui Zhijiu, Chen Yixin, Zhang Wei, et al. Research history, glacial chronology and origins of quaternary glaciations in China. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(5): 749-764. [崔之久, 陈艺鑫, 张威, 等. 中国第四纪冰期历史、特征及成因探讨. *第四纪研究*, 2011, 31(5): 749-764.]
- [34] Zhou Shangzhe, Yi Chaolu, Shi Yafeng, et al. Study on the Ice Age MIS12 in western China. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7(4): 321-327. [周尚哲, 易朝路, 施雅风, 等. 中国西部 MIS12 冰期研究. *地质力学学报*, 2001, 7(4): 321-327.]
- [35] Zheng Benxing. Quaternary glaciation and glacier evolution in the Yulong Mount, Yunnan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(1): 53-61. [郑本兴. 云南玉龙雪山第四纪冰期与冰川演化模式. *冰川冻土*, 2000, 22(1): 53-61.]
- [36] Zhou Shangzhe, Li Jijun. New dating results of Quaternary glaciations in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 660-666. [周尚哲, 李吉均. 第四纪冰川测年研究新进展. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 660-666.]
- [37] Yang J Q, Zhang W, Cui Z J, et al. Late Pleistocene glaciation of the Diancang and Gongwang Mountains, southeast margin of the Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 2006, 154/155: 52-62.
- [38] Zhao Jingdong, Shi Yafeng, Wang Jie. Comparison between Quaternary glaciations in China and the Marine Oxygen Isotope Stage (MIS): An improved schema. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 867-884. [赵井东, 施雅风, 王杰. 中国第四纪冰川演化序列与 MIS 对比研究的新进展. *地理学报*, 2011, 66(7): 867-884.]
- [39] Liu Gengnian, Cheng Yixin, Zhang Mei, et al. Glacial landform chronology and environment reconstruction of Peiku Gangri, Himalayas. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 959-970. [刘耕年, 陈艺鑫, 张梅, 等. 喜马拉雅山佩枯岗日冰川地貌的年代学、平衡线高度和气候研究. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 959-970.]
- [40] Zhao Jingdong, Shi Yafeng, Li Zhongqin. Glacial geomorphology and glaciations at the headwaters of the Ürümqi River, Tianshan Mountain, China: Review and prospect. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 118-125. [赵井东, 施雅风, 李忠勤. 天山乌鲁木齐河流域冰川地貌与冰期研究的回顾与展望. *冰川冻土*, 2011, 33(1): 118-125.]
- [41] Zhao Jingdong, Wang Jie, Shen Yongping, et al. Distribution and features of glacial landforms in the northwest of the Die Shan, West Qinling Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(4): 841-847. [赵井东, 王杰, 沈永平, 等. 西秦岭迭山西北部冰川地貌分布及其特征. *冰川冻土*, 2013, 35(4): 841-847.]
- [42] Wang Jie, Zhou Shangzhe, Zhao Jingdong, et al. Quaternary glacial geomorphology and glaciations of Kongur Mountain, Eastern Pamir, China. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 41(3): 350-361. [王杰, 周尚哲, 赵井东, 等. 东帕米尔公格尔山地区第四纪冰川地貌与冰期. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(3): 350-361.]
- [43] Xie Youyu, Cui Zhijiu. On nonglacial genesis of "Glaciated Relics" of Lushan. *Acta Geographica Sinica*, 1983, 38(3): 298-308. [谢又予, 崔之久. 庐山“冰川遗迹”质疑. *地理学报*, 1983, 38(3): 298-308.]
- [44] Sang Guangshu, Ye Wei, Lv Huijin, et al. Study on landforms in the areas of the eastern part of Zhejiang Province: Discussion on Quaternary glacial remains in Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences)*, 2011, 34(2): 217-222. [桑广书, 叶玮, 吕惠进, 等. 试论浙江东部四明山、天台山、大盘山地区的地貌: 对浙江“第四纪冰川遗迹”的讨论. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 34(2): 217-222.]
- [45] Xia Kairu. Preliminary observation on paleoglaciation geomorphic character of marginal glacier in northern part of

- Qilian Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 1960, 26(3): 165-180. [夏开儒. 祁连山北段古冰川作用与冰缘地貌特征的初步观察. *地理学报*, 1960, 26(3): 165-180.]
- [46] Zhu Cheng, Cui Zhijiu. The distribution and evolution of periglacial landforms in the source region of Urumqi River on the Tianshan Mountain. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(6): 526-535. [朱诚, 崔之久. 天山乌鲁木齐河源区冰缘地貌的分布和演变过程. *地理学报*, 1992, 47(6): 526-535.]
- [47] Zhao Shangmin, Cheng Weiming, Chai Huixia, et al. Research on the information extraction method of periglacial geomorphology on the Qinghai-Tibet Plateau based on remote sensing and SRTM: A case study of 1:1000000 Lhasa Map Sheet (H46). *Geographical Research*, 2007, 26(6): 1175-1185. [赵尚民, 程维明, 柴慧霞, 等. 基于遥感与SRTM的青藏高原冰缘地貌信息提取方法: 以1:100万标准分幅拉萨幅(H46)为例. *地理研究*, 2007, 26(6): 1175-1185.]
- [48] Wu Jichun, Sheng Yu, Cao Yuanbing, et al. Discovery of large forst mound clusters in the source regions of the Yellow River on the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(5): 1217-1228. [吴吉春, 盛煜, 曹元兵, 等. 青藏高原发现大型冻胀丘群. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1217-1228.]
- [49] Zhang Wei, Liu Rui, Wei Yagang, et al. Periglacial geomorphologic characteristics and environment in Taibai, the Qinling Mountain. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(10): 171-178. [张威, 刘锐, 魏亚刚, 等. 秦岭太白山冰缘地貌特征与环境. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(10): 171-178.]
- [50] Liu Jiangang, Zhang Hua, Fu Jie, et al. Periglacial landforms in the Mt. Laotudingzi of eastern Liaoning Province: Characteristics and environmental significance. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(6): 1420-1429. [刘剑刚, 张华, 伏捷, 等. 辽东山地老秃顶子冰缘地貌特征及其环境意义. *冰川冻土*, 2014, 36(6): 1420-1429.]
- [51] Zhu Xiaxia, Zhang Hua, Zhu Yan, et al. Forest community species diversity and the influencing factors in the rock stream periglacial landforms of Mt. Laotudingzi. *Plant Science Journal*, 2016, 16(1): 67-77. [朱夏夏, 张华, 朱岩, 等. 老秃顶子石河冰缘地貌森林群落物种多样性及其影响因素. *植物科学学报*, 2016, 16(1): 67-77.]
- [52] Lv Xiuzhi, Guo Donggang, Shangguan Tieliang. Analysis of the plant community diversity in the periglacial landforms in Wutai Mountain, Shanxi Province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(3): 626-633. [吕秀枝, 郭东罡, 上官铁梁. 五台山冰缘地貌植物群落多样性分析. *冰川冻土*, 2010, 32(3): 626-633.]
- [53] Greeley R, Versen J. *Wind as A Geological Process*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [54] Lancaster N. *Dune morphology and dynamics*//Abrahams A D, Parsons A J. *Geomorphology of Desert Environments*. London: Chapman and Hall, 1994.
- [55] Zhang Zhengcai, Dong Zhibao. Research progress on aeolian geomorphology and morphodynamics. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(6): 734-747. [张正偲, 董治宝. 风沙地貌形态动力学研究进展. *地球科学进展*, 2014, 29(6): 734-747.]
- [56] Lu Qi. *Desertification: Urgent Challenge China Faces*. Beijing: Kaiming Press, 2000: 12-20. [卢琦. *中国沙情*. 北京: 开明出版社, 2000: 12-20.]
- [57] Zhu Junfeng, Zhu Zhenda. *Desert Combating in China*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999. [朱俊凤, 朱震达. *中国沙漠化防治*. 北京: 中国林业出版社, 1999.]
- [58] Zhu Junfeng, Shen Yuancun. *Deserticulture in China*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004. [朱俊凤, 申元村. *中国沙产业*. 北京: 中国林业出版社, 2004.]
- [59] Shao Tianjie, Zhao Jingbo, Dong Zhibao. Particle size composition and geomorphology zoning of the megadune in the Badain Jaran Desert. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(4): 434-441. [邵天杰, 赵景波, 董治宝. 巴丹吉林沙漠沙山粒度组成与沙山地貌分带. *山地学报*, 2013, 31(4): 434-441.]
- [60] Cui Xujia, Dong Zhibao, Lu Junfeng, et al. Relationship between vegetation feature and physiognomy morphology of mega-dunes in Badain Jaran Desert. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(5): 278-283. [崔徐甲, 董治宝, 逯军峰, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山区植被特征与地貌形态的关系. *水土保持通报*, 2014, 34(5): 278-283.]
- [61] Yang Xiaoping. Landscape types and its formation mechanism in the Badain Jaran Desert and its surrounding areas. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(2): 65-69. [杨小平. 巴丹吉林沙漠及其毗邻地区的景观类型及其形成机制初探. *中国沙漠*, 2000, 20(2): 65-69.]
- [62] Guo Hongxu, Wang Xueqin, Jiang Jin, et al. Wind regime and its geomorphologic significance in the hinterland of Gurbantonggut Desert. *Arid Zone Research*, 2011, 28(4): 580-585. [郭洪旭, 王雪芹, 蒋进, 等. 古尔班通古特沙漠腹地输沙风能及地貌学意义. *干旱区研究*, 2011, 28(4): 580-585.]
- [63] Wen Qing, Dong Zhibao, Lu Jinhua, et al. Compilation of geomorphologic map of the Tengger Desert. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(1): 35-41. [文青, 董治宝, 陆锦华, 等. 1:40万《腾格里沙漠地貌图》的编制. *中国沙漠*, 2014, 34

- (1): 35-41.]
- [64] Liu Dongsheng, Zhang Zonghu. The loess in China. *Acta Geologica Sinica*, 1962, 41(1): 1-14. [刘东生, 张宗祜. 中国的黄土. *地质学报*, 1962, 42(1): 1-14.]
- [65] Scientific Survey Team for Loess Plateau, Chinese Academy of Sciences. A Series of Study on the Comprehensive Development of the Loess Plateau - Natural Environment in the Loess Plateau and Its Evolution. Beijing: Science Press, 1991. [中国科学院黄土高原地区综合科学考察队. 黄土高原地区综合治理开发考察系列研究: 黄土高原地区自然环境及其演变. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [66] Liu Dongsheng, et al. *Loess and the Environment*. Beijing: Science Press, 1985: 106-111. [刘东生, 等. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985: 106-111.]
- [67] Xiong Liyang, Tang Guoan, Yuan Baoyin, et al. Geomorphological inheritance for loess landform evolution in a severe soil erosion region of Loess Plateau of China Based on Digital Models. *Science China: Earth Sciences*, 2014(2): 313-321. [熊礼阳, 汤国安, 袁宝印, 等. 基于DEM的黄土高原(重点流失区)地貌演化的继承性研究. *中国科学: 地球科学*, 2014(2): 313-321.]
- [68] Jing Ke, Lu Jinfa, Liang Jiyang, et al. *Erosion Environment Character and Change Direction in the Middle Reach of Huanghe River*. Zhangzhou: Huanghe Water Conservancy Press, 1997. [景可, 卢金发, 梁季阳, 等. 黄河中游侵蚀环境特征和变化趋势. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.]
- [69] Jing Ke, Chen Yongzong, Li Fengxin. *Sediment and Environment in the Huanghe River*. Beijing: Science Press, 1993. [景可, 陈永宗, 李凤新. 黄河泥沙与环境. 北京: 科学出版社, 1993.]
- [70] Zhang Shengli, Yu Yiming, Yao Wenyi. *Method of Water and Sand Reduction Benefits for Soil and Water Conservation*. Beijing: China Environmental Science Press, 1994. [张胜利, 于一鸣, 姚文艺. 水土保持减水减沙效益计算方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.]
- [71] Wang Yunzhang, Peng Meixiang, Wei Liye. Characteristics of precipitation in the Middle Yellow River and its effects on sediment entering into the Yellow River in 1980's. *Yellow River*, 1992, 5(5): 10-14. [王云璋, 彭梅香, 温丽叶. 80年代黄河中游降雨特点及其对入黄沙量的影响. *人民黄河*, 1992, 5(5): 10-14.]
- [72] Guo Tingfu, Duan Qiaofu. *Conservation of Water and Soil Runoff Regulation Theory and Practice*. Beijing: China Water & Power Press, 2004. [郭廷辅, 段巧甫. 水土保持径流调控理论与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.]
- [73] Shen Yuancun, Hong Qinghua. Strategy to control soil erosion effectively in the Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(2): 22-27. [申元村, 洪清华. 黄土高原土壤侵蚀有效防治战略. *中国水土保持科学*, 2003, 1(2): 22-27.]
- [74] Shen Yuancun, Yang Qinye, Jing Ke, et al. Strategic thinking on speeding up ecological building of soil water conservation in the Loess Plateau. *Soil and Water Conservation in China*, 2004, 21(6): 6-7. [申元村, 杨勤业, 景可, 等. 加快黄土高原水土保持生态建设的战略思考. *中国水土保持*, 2004, 21(6): 6-7.]
- [75] Cai Lingyan, Tang Guoan, Xiong Liyang, et al. An analysis on fractal characteristics of typical landform patterns in northern Shaanxi Loess Plateau on DEM. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(3): 141-144. [蔡凌雁, 汤国安, 熊礼阳, 等. 基于DEM的陕北黄土高原典型地貌分形特征研究. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 141-144.]
- [76] Yang Yang, Bi Rutian. Fractal characteristics of land-use for typical geomorphic types in Loess Plateau. *Geography and Geo-Information Science*, 2011, 27(1): 101-104. [杨洋, 毕如田. 黄土高原典型地貌类型的土地利用分形特征. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(1): 101-104.]
- [77] Yang Qinke, Guo Lanqin, Wang Chunmei. Extracting and analyzing slope and length based on ASTER GDEM and SRTM elevation datasets. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(6): 142-146. [杨勤科, 郭兰勤, 王春梅. 基于ASTER和SRTM高程数据的坡度和坡长提取与分析. *水土保持通报*, 2012, 32(6): 142-146.]
- [78] Qiu Haijun, Cui Peng, Hu Sheng, et al. Size-frequency distribution of landslides in different landforms on the Loess Plateau of Northern Shaanxi. *Earth Science*, 2016, 42(2): 343-350. [邱海军, 崔鹏, 胡胜, 等. 陕北黄土高原不同地貌类型区黄土滑坡频率分布. *地球科学*, 2016, 41(2): 343-350.]
- [79] Xu Shuang, Li Feixue, Liu Aili, et al. Research on spatial variability of elevation in typical loess landform. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(5): 1-6. [徐双, 李飞雪, 刘爱利, 等. 典型黄土地貌高程空间变异性研究. *水土保持研究*, 2014, 21(5): 1-6.]
- [80] Jiang Ling, Tang Guoan, Zhao Mingwei, et al. Extraction and analysis of loess gully heads considering geomorphological structures. *Geographical Research*, 2013, 32(11): 2153-2162. [江岭, 汤国安, 赵明伟, 等. 顾及地貌结构特征的黄土沟头提取及分析. *地理研究*, 2013, 32(11): 2153-2162.]

- [81] Zhang Lei, Tang Guoan, Li Fayuan, et al. A review on research of loess shoulder-line. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(6): 44-48. [张磊, 汤国安, 李发源, 等. 黄土地貌沟沿线研究综述. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(6): 44-48.]
- [82] Zhao Shangmin, He Weican, Wang Li. Error distribution analysis of SRTM3 DEM V4 data in the typical geomorphologic area of Loess Plateau. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(2): 67-70. [赵尚民, 何维灿, 王莉. DEM 数据在黄土高原典型地貌区的误差分布. *测绘科学*, 2016, 41(2): 67-70.]
- [83] Yan Sjijiang, Tang Guoan, Li Fayuan, et al. An edge detection based method for extraction of Loess Shoulder-line from grid DEM. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 363-367. [晏实江, 汤国安, 李发源, 等. 利用 DEM 边缘检测进行黄土地貌沟沿线自动提取. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2011, 36(3): 363-367.]
- [84] Liu Wei, Li Fayuan, Xiong Liyang, et al. Shoulder line extraction in the Loess Plateau based on region growing algorithm. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(2): 220-226. [刘玮, 李发源, 熊礼阳, 等. 基于区域生长的黄土地貌沟沿线提取方法与实验. *地球信息科学学报*, 2016, 18(2): 220-226.]
- [85] Chen Yonggang, Tang Guoan, Zhou Yi, et al. The positive and negative terrain of Loess Plateau extraction based on the multi-azimuth DEM shaded relief. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(1): 105-109. [陈永刚, 汤国安, 周毅, 等. 基于多方位 DEM 地形晕渲的黄土地貌正负地形提取. *地理科学*, 2012, 32(1): 105-109.]
- [86] Zeng Zhaoxuan. Some questions of limestone landform types in South China. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 44(1): 119-128. [曾昭璇. 中国南部石灰岩地貌类型若干问题. *地质学报*, 1964, 44(1): 119-128.]
- [87] Yuan Daoxian. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(2): 98-100. [袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题. *中国岩溶*, 2015, 34(2): 98-100.]
- [88] Yang Hailan, Zhang Liheng, Wei Chuntao. Study on karst SAR image registration methods. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(1): 72-76. [杨海兰, 张利恒, 韦春桃. 喀斯特地貌 SAR 影像多级配准方法. *测绘科学*, 2015, 40(1): 72-76.]
- [89] Zhang Liheng. Study on SAR image registration methods of karst geographic [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2013. [张利恒. 喀斯特地貌 SAR 影像配准方法研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2013.]
- [90] Zhang Yongrong, Zhou Zhongfa, Yan Lihui. An analysis of the evolutionary characteristics of rocky desertification in the karst plateau of Guizhou. *China Rural Water and Hydropower*, 2005(3): 59-63. [张勇荣, 周忠发, 闫利会. 贵州喀斯特高原峡谷和盆地典型区石漠化演变特征分析. *中国农村水利水电*, 2015(3): 59-63.]
- [91] Wang Shijie, Zhang Xinbao, Bai Xiaoyong. An outline of karst geomorphology zoning in the karst areas of southern China. *Journal of Mountain Science*, 2015, 33(6): 641-648. [王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要. *山地学报*, 2015, 33(6): 641-648.]
- [92] Gao Jianfei, Xiong Kangning. Correlation of karst rock desertification and land use patterns in different geomorphologic environment. *Bulletin of Soil Water Conservation*, 2014, 34(3): 97-101. [高渐飞, 熊康宁. 不同地貌环境下喀斯特石漠化与土地利用的关系. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 97-101.]
- [93] Gao Xiang, Wang Ji, Cai Xiongfei, et al. Study on soil erosion model under different slope in Southwest Karst Mountain Area. *Agricultural Science & Technology*, 2013, 41(12): 1847-1851.
- [94] Peng Xudong, Dai Quanhong, Yang Zhi, et al. Sediment Yield of surface and underground erosion in the progress of rocky desertification of karst area. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1237-1248. [彭旭东, 戴全厚, 杨智, 等. 喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1237-1248.]
- [95] Li Fei, Yang Xiaoping, Hao Hongke. Based on the DEM of Karst land form mountain and water system of information extraction: With Yangshuo County as an example. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015(8): 73-76. [李飞, 杨小平, 郝红科. 基于 DEM 对喀斯特地貌山地及水系信息的提取: 以桂林阳朔县为例. *测绘与空间地理信息*, 2015(8): 73-76.]
- [96] Sheng Yuchang, Cai Qiangguo. On attempt to study the progress of river geomorphology in the foreign countries. *Geographical Research*, 1985, 4(2): 79-88. [沈玉昌, 蔡强国. 试论国外河流地貌学的进展. *地理研究*, 1985, 4(2): 79-88.]
- [97] Qian Ning. On the classification and causes of formation of different channel patterns. *Acta Geographica Sinica*, 1985, 40(1): 1-10. [钱宁. 关于河流分类及其成因问题的讨论. *地理学报*, 1985, 40(1): 1-10.]
- [98] Xu Jiongxin. Increasing trend of green water coefficient in the middle Yellow River Basin and eco-environment implications. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7298-7307. [许炯心. 黄河中游绿水系数变化及其生态环境意义. *生态学报*, 2015, 35(22): 7298-7307.]

- [99] Wang Jiping, Huang Zhilin, Liu Yang, et al. Quantitative analysis of the relationship between watershed topography and erosion-sediment processes: A case study of Hekou-Longmen section in Middle Yellow River. *Geographical Research*, 2013, 32(2): 275-284. [王计平, 黄志霖, 刘洋, 等. 地貌格局与流域侵蚀产沙过程关系定量分析: 以黄河中游河龙区间为例. *地理研究*, 2013, 32(2): 275-284.]
- [100] Guo Leicheng, He Qing, Roelvink D, et al. Medium- to long-term morphodynamic modeling in estuaries and coasts: Principles and applications. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(9): 1182-1196. [郭磊城, 何青, Roelvink D, 等. 河口海岸中长时间尺度动力地貌系统模拟研究与进展. *地理学报*, 2013, 68(9): 1182-1196.]
- [101] Wang Yonghong, Shen Huanting, Li Jiufa, et al. Geomorphologic features and transport of sandwaves in the flood and EBB channels of the Changjiang Estuary. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(2): 330-336. [王永红, 沈焕庭, 李九发, 等. 长江河口涨、落潮槽内的沙波地貌和输移特征. *海洋与湖沼*, 2011, 42(2): 330-336.]
- [102] Xu Jiongxin, Cai Qiangguo, Li Bingyuan, et al. Research progress in river geomorphology in China: In memory of 100-year anniversary of Shen Yuchang's birth. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 2020-2036. [许炯心, 蔡强国, 李炳元, 等. 中国河流地貌学研究进展: 纪念沈玉昌先生 100 年诞辰. *地理学报*, 2016, 71(11): 2020-2036.]
- [103] Chen Zhiming. Latest advances of branch geomorphological survey and mapping in China. *Science Geographica Sinica*, 1985, 5(3): 259-266. [陈志明. 我国部门地貌调查与制图的新进展. *地理科学*, 1985, 5(3): 259-266.]
- [104] Ren Meie. Relative sea level rise in Huanghe Changjiang and Zhujiang (Yellow, Yangtze and Pearl River) Delta over the last 30 years and predication for the next 40 years (2030). *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(5): 385-393. [任美镔. 黄河长江珠江三角洲近 30 年海平面上升趋势及 2030 年上升量预测. *地理学报*, 1993, 48(5): 385-393.]
- [105] Committees of Landform and Quaternary of the Geographical Society of China. *Development and Evolution of China's Coast*. Shanghai: Scientific & Technical Press, 1989. [中国地理学会地貌与第四纪专业委员会. *中国海岸发育过程和演变规律*. 上海: 科学技术出版社, 1989.]
- [106] Zhang Yongzhan, Wang Yin. New progress in coastal ocean sciences research. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(4): 446-446. [张永战, 王颖. 海岸海洋科学研究新进展. *地理学报*, 2006, 61(4): 446-446.]
- [107] Wang Ying, Ji Xiaomei. Environmental characteristics and changes of coastal ocean as land-ocean transitional zone of China. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 129-135. [王颖, 季小梅. 中国海陆过渡带: 海岸海洋环境特征与变化研究. *地理科学*, 2011, 31(2): 129-135.]
- [108] Li Mengmeng, Wang Qing, Zhang Anding, et al. Study on the geomorphic evolution of the muddy coast along the southern-western Laizhou Bay over the past 50 years. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(2): 141-151. [李蒙蒙, 王庆, 张安定, 等. 最近 50 年来莱州湾西—南部淤泥质海岸地貌演变研究. *海洋通报*, 2013, 32(2): 141-151.]
- [109] Zheng Yongling, Wu Chengqiang, Cai Feng, et al. The resent research trend of China's submarine geomorphology and new discoveries of the East China Sea offshore. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(9): 1026-1034. [郑勇玲, 吴承强, 蔡锋, 等. 我国海底地貌研究进展及其在东海近海的新发现、新认识. *地球科学进展*, 2012, 27(9): 1026-1034.]
- [110] Cui Junwen, Li Pengwu, Li Li. Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic geomorphology and lithospheric structure of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Review*, 2001, 47(2): 157-163. [崔军文, 李朋武, 李莉. 青藏高原的隆升: 青藏高原的岩石圈结构和构造地貌. *地质论评*, 2001, 47(2): 157-163.]
- [111] Chen Zhiming. *Land, Sea and Geomorphological Map to Adjacent Areas in Asia*. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2011. [陈志明. *亚洲与邻区陆海地貌全图*. 北京: 测绘出版社, 2011.]
- [112] Pan Baotian, Gao Hongshan, Li Bingyuan, et al. Step-like landforms and uplift of the Qinghai-Xizang Plateau. *Quaternary Sceinces*, 2004, 24(1): 50-57. [潘保田, 高红山, 李炳元, 等. 青藏高原层状地貌与高原隆升. *第四纪研究*, 2004, 24(1): 50-57.]
- [113] Mo Duowen, Xia Zhengkai, Zhu Cheng. Prof. Wang Nailiang's contributions to the geomorphological research in China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(13): 2037-2048. [莫多闻, 夏正楷, 朱诚. 王乃樑先生对中国地貌学发展的主要贡献. *地理学报*, 2016, 71(13): 2037-2048.]
- [114] Wang An, Wang Guocan. Review on morphotectonic and its analytical methods. *Geological Science and Technology Information*, 2005, 24(4): 7-12. [王岸, 王国灿. 构造地貌及其分析方法述评. *地质科技情报*, 2005, 24(4): 7-12.]
- [115] Shi Xingmin, Du, Zhongchao. Review and prospect of tectonic geomorphology in China. *Northwestern Seismological Journal*, 2006, 28(3): 280-284. [史兴民, 杜忠潮. 中国构造地貌学的回顾与展望. *西北地震学报*, 2006, 28(3): 280-284.]
- [116] Ma Zhenhua, Li Xiaomiao, Guo Benhong, et al. Extraction and analysis of Maxianshan planation surfaces in northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 400-411. [马振华, 李小苗, 郭本泓,

- 等. 青藏高原东北缘马衔山夷平面特征指标的提取与分析. 地理学报, 2016, 71(3): 400-411.]
- [117] Gao M X, Zeilinger G, Xu X W, et al. DEM and GIS analysis of geomorphic indices for evaluating recent uplift of the northeastern margin of the Tibetan Plateau, China. *Geomorphology*, 2013, 190: 61-72.
- [118] Liu Jiaqi. *Volcano in China*. Beijing: Science Press, 1999. [刘嘉麒. 中国火山. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [119] Shi Yafeng, et al. *Advance of Climate and Sea Level Changes Research in China (1/2)*. Beijing: China Ocean Press, 1990-1992. [施雅风, 等. 中国气候与海面变化研究进展(一、二). 北京: 海洋出版社. 1990-1992.]
- [120] Shi Yafeng, Li Jijun, Li Bingyuan, et al. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and East Asia environmental change during Late Cenozoic. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(1): 10-20. [施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. 地理学报, 1999, 54(1): 10-20.]
- [121] Shi Yafeng, Zheng Benxing, Li Shijie, et al. Studies on altitude and climatic environment in the middle and east parts of Tibetan Plateau during Quaternary Maximum Glaciation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(2): 97-112. [施雅风, 郑本兴, 李世杰, 等. 青藏高原中东部最大冰期时代高度与气候环境探讨. 冰川冻土, 1995, 17(2): 97-112.]
- [122] Zhang Wei, Dong Yingwei, Yu Zhilong, et al. Discussion of the difference of the timing and extent of glaciers in the Late Quaternary controlled by the westerly and East Asia monsoon as well as the tectonic movement. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 909-920. [张威, 董应巍, 于治龙, 等. 气候和地貌对晚第四纪冰川发育差异性的影响. 地理学报, 2013, 68(7): 909-920.]
- [123] Lv Honghua, Zhang Tianqi, Chang Yanchun, et al. Timing of paleotopographic and geomorphologic evolution and paleotopographic reconstruction by low-temperature thermochronologic approaches. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(3): 175-183. [吕红华, 张天琪, 常艳春, 等. 地形地貌发育时间与古地形反演. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(3): 175-183.]
- [124] Lin Changsong, Xia Qinglong, Shi Hesheng, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 9-20. [林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析. 地学前缘, 2015, 22(1): 9-20.]
- [125] Yang Shunhu, Fu Bihong, Shi Pulong. Late Quaternary structural deformation and tectono-geomorphic features along the Xiugou Basin Segment, Eastern Kunlun fault zone. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(5): 921-930. [杨顺虎, 付碧宏, 时丕龙. 东昆仑活动断裂带秀沟盆地晚第四纪构造变形与地貌特征研究. 第四纪研究, 2012, 32(5): 921-930.]
- [126] Meng Kai, Shi Xuhua, Wang Erqi, et al. Geomorphic characteristics, spatial distribution of paleoshorelines around the Siling Co area, Central Tibetan Plateau, and the lake evolution within the plateau. *Chinese Journal of Geology*, 2012, 47(3): 730-745. [孟恺, 石许华, 王二七, 等. 青藏高原中部色林错区域古湖滨线地貌特征、空间分布及高原湖泊演化. 地质科学, 2012, 47(3): 730-745.]
- [127] Yue Shengyang, Miao Shui, Xu Haipeng. Ancient geomorphological environmental evolution of the ancient Jicheng area in Beijing: A case of the geotechnical profile in the construction field of Guangyi Building. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(5): 845-852. [岳升阳, 苗水, 徐海鹏. 北京古蓟城城址古地貌环境演变研究: 以广义大厦工程剖面为例. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 845-852.]
- [128] Hu Xiaomeng, Chen Meijun, Wang Dutao, et al. The sequence difference in the times in the geomorphic-sedimentary evolution in the Fenwei graben basins during the middle-late Quaternary and its tectonic significance. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(5): 849-858. [胡小猛, 陈美君, 王杜涛, 等. 汾渭地堑系列湖盆第四纪中晚期地貌与沉积阶段性演化的时间序次差异及其构造指示意义. 第四纪研究, 2012, 32(5): 849-858.]
- [129] Yuan Zhen, Li Wenhui, Zhu Jing, et al. The restoration of pre-Jurassic paleogeomorphology and its influence on oil accumulation in Longdong area. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(11): 1806-1814. [袁珍, 李文厚, 朱静, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区侏罗系古地貌恢复及其对石油聚集的影响. 地质通报, 2013, 32(11): 1806-1814.]
- [130] Wang Jiannin, Wang Jiayuan, Sha Jianhui, et al. Karst paleogeomorphology and comprehensive geological model of the Ordovician weathering crust in the eastern Ordos Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(2): 409-418. [王建民, 王佳媛, 沙建怀, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶古地貌特征及综合地质模型. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(2): 409-418.]
- [131] Pang Jungang, Yang Youyun, Wang Guicheng, et al. Reconstruction of the sedimentary microfacies and paleogeomorphology in early Jurassic of Wang Wazi area of Wuqi County, Ordos Basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2014, 50(4): 465-471. [庞军刚, 杨友运, 王桂成, 等. 鄂尔多斯盆地吴起王洼子地区早侏罗世沉积微相及古地貌恢复. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(4): 465-471.]

- [132] Lu Huayi, Guo Zhengtang. Evolution of the monsoon and climate in East Asia during Late Cenozoic: A review. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(12): 1907-1918. [鹿化煜, 郭正堂. 晚新生代东亚气候变化: 进展与问题. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(12): 1907-1918.]
- [133] Huang Jin, Chen Zhijun, Qi Deli. Distribution of Danxia landform in China (Last). *Journal of Mountain Science*, 2015 (6): 649-673. [黄进, 陈致均, 齐德利. 中国丹霞地貌分布(下). 山地学报, 2015, 33(6): 649-673.]
- [134] Peng Hua. A survey of the Danxia landform research in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(3): 203-211. [彭华. 中国丹霞地貌研究进展. 地理科学, 2000, 20(3): 203-211.]
- [135] Guo Fusheng, Jiang Fuwei, Jiang Yongbiao, et al. The development directions of Danxia landform research. *Journal of East China Institute of Technology*, 2013(3): 207-212. [郭福生, 姜伏伟, 姜勇彪, 等. 丹霞地貌研究的几个发展方向. 东华理工大学学报(社会科学版), 2013(3): 207-212.]
- [136] Zhao Ding, Zhao Xun, Peng Hua, et al. A tentative discussion on the definition and classification of Danxia landform. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 69(3): 375-382. [赵汀, 赵逊, 彭华, 等. 关于丹霞地貌概念和分类的探讨. 地球学报, 2014, 69(3): 375-382.]
- [137] Zhang Guangsheng, Hao Lixia, Tan Lugui, et al. Geological background and landscape characteristics of Danxia landform at the northern slope of the Dabie Mountain. *Journal of West Anhui University*, 2015(5): 1-6. [张广胜, 郝李霞, 谭绿贵, 等. 大别山北麓丹霞地貌的地质背景与景观特征研究. 皖西学院学报, 2015(5): 1-6.]
- [138] Li Xia, He Qiongheng, Dong Yin, et al. An analysis of characteristics and evolution of Danxia landform in the south of Chishui County, Guizhou. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013(4): 501-508. [李霞, 何庆成, 董颖, 等. 贵州赤水南部地区丹霞地貌类型特征及成因演化分析. 地球学报, 2013(4): 501-508.]
- [139] Qi Deli, Chen Zhijun, Wang Suiji, et al. Stratigraphic classification, evolution stage and geomorphologic age of Kongtongshan Danxia landform in Pingliang, Gansu, China. *Mountain Research*, 2015(4): 408-415 [齐德利, 陈致均, 王随继, 等. 崆峒山丹霞地貌地层归属演化及地貌年龄. 山地学报, 2015(4): 408-415.]
- [140] Cui Zhijiu, Yang Jianqiang, Chen Yixin. The type and evolution of the granite landforms in China. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(7): 675-690. [崔之久, 杨建强, 陈艺鑫. 中国花岗岩地貌的类型特征与演化. 地理学报, 2007, 62 (7): 675-690.]
- [141] Chen Yixin, Cui Zhijiu, Yang Jianqiang. Influence of climate and tectonic movements on granite landforms in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(4): 587-599.
- [142] Hu Xiaomeng, Xu Honggeng, Chen Meijun, et al. The rhyolite landforms and development law in Yangdang Mt. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 62(3): 270-279. [胡小猛, 许红根, 陈美君, 等. 雁荡山流纹岩地貌景观特征及其形成发育规律. 地理学报, 2008, 62(3): 270-279.]
- [143] Cheng Weiming, Wang Nan, Zhao Min, et al. Relative tectonics and debris flow hazards in the Beijing mountain area from DEM-derived geomorphic indices and drainage analysis. *Geomorphology*, 2016, 257: 134-142.
- [144] Li Jialin, Yang Lei, Yang Xiaoping. Progress in anthropogenic geomorphology. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(3): 447-460. [李加林, 杨磊, 杨晓平. 人工地貌学研究进展. 地理学报, 2015, 70(3): 447-460.]
- [145] Xu Jiongxin, Li Bingyuan, Yang Xiaoping, et al. Recent progress in geomorphology and Quaternary geology in China and some perspectives. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1375-1393. [许炯心, 李炳元, 杨小平, 等. 中国地貌与第四纪研究的近今进展与未来展望. 地理学报, 2009, 64(11): 1375-1393.]
- [146] Shi Changxing, Xu Jiongxin, Cai Qiangguo, et al. Retrospect and prospect of geomorphology in IGSNRR, CAS. *Geographical Research*, 2010, 29(9): 1546-1560. [师长兴, 许炯心, 蔡强国, 等. 地貌过程研究回顾与展望. 地理研究, 2010, 29(9): 1546-1560.]

Retrospect and perspective of geomorphology researches in China over the past 40 years

CHENG Weiming^{1,2}, ZHOU Chenghu¹, SHEN Yuancun¹, LIU Qiangyi^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in

Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstracts: Geomorphology is one of main branches of geography. The research achievements and prospects in geomorphology have received considerable attention for a long time. In this paper, we firstly gave a general retrospect of geomorphological research in China over the past 60 years, especially the research progresses in the last 40 years. Based on a summary of experience and a tendency of development, perspectives of geomorphological research direction in the future were provided. It is concluded that the discipline of geomorphology has made great progress in the aspects of geomorphological types, partitions, as well as their subdisciplines such as dynamic geomorphology, tectonic geomorphology, climatic geomorphology, lithological geomorphology, palaeogeomorphology. We believe that persisting in the unity principle between morphological and genetic types would be conducive for the development of traditional landforms and integrated landforms. In addition, five perspectives aim to enhance China's geomorphological research capacity. They are: (1) strengthening the research of basic geomorphology theory and the research of integrated geomorphology to expand the research space; (2) focusing more on the research of geomorphologic structure and geomorphologic function to improve the application ability of geomorphology; (3) constructing a comprehensive resource, environmental, and geomorphologic information system and building a sharing platform to upgrade the intelligent information industry of geomorphology; (4) putting more efforts on the research of coastal geomorphology and marine geomorphology to assist the transformation of China from a maritime country to an ocean power; and (5) cultivating talents and constructing research teams to maintain a sustainable development of China's geomorphological research.

Keywords: retrospect; perspective; geomorphology; China