

· 专题一:双清论坛“黄河流域生态保护与可持续发展” ·

黄河流域地质—地貌—气候多过程相互作用及其孕灾机制研究

兰恒星^{1,2*} 祝艳波¹ 李郎平² 潘保田³ 胡振波³ 彭建兵¹

1. 长安大学 地质工程与测绘学院,西安 710064

2. 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

3. 兰州大学 资源环境学院,兰州 730000

[摘要] 黄河流域地质构造活跃、地貌演化过程迅速、气候分异特征显著、重大灾害频发;其中地质地貌与气候过程相互关联,重大灾害效应相互联动。但目前黄河流域地质地貌与气候过程研究仍处于“分段孤立”状态,多集中在各河段地质—地貌—气候相互作用及其对重大灾害影响分析上,缺少流域尺度的地质—地貌—气候多过程作用及其孕灾机制方面的系统研究。为此,本文详细梳理了与黄河流域地质过程、地貌演化与气候变化有关的国内外研究现状,分析了流域地质—地貌—气候多过程相互作用及其孕灾机制方面的发展动态,探讨了研究趋势和面临的挑战,分析了亟需突破的关键科学问题,并基于地球系统科学思想提出了研究建议。黄河流域地质、地貌和气候过程及其联动孕灾机制亟待突破的关键科学问题为:如何揭示“地质—地貌—气候多过程互馈、灾害全流域联动”的重大灾害孕育机制。研究建议为:以地球系统科学理论为指导,从“重建历史—聚焦现代—展望未来”时间轴尺度重建黄河流域地质、地貌与气候的长时序耦合联动作用过程。

[关键词] 地质构造;地貌演化;气候变化;联动过程;孕灾机制

1 黄河流域地质—地貌—气候相互作用及其孕灾机制研究意义

黄河流域重大灾害类型多、分布广、危害重且形成机制复杂^[1],如上游沿河分布了大量巨型滑坡^[2,3]、堰塞湖^[4]、泥石流等地质灾害,部分滑坡历史上曾堵塞黄河,并溃决形成过大洪水^[5];中游黄土高原发育了占全国近1/3的崩滑流地质灾害^[6],仅陕北地区就有黄土崩塌23000多个、黄土滑坡16600多个,密度超过10个/km²^[7],易造成群死群伤和重大财产损失;下游决口和河流改道频发,历史上频繁发生巨型洪水灾害^[8],曾发生了1500多次决口事件,以及至少26次大型改道事件^[9,10],当前悬河段也正面临着极大的溃决风险。这些重大灾害直接破坏黄河流域生态环境,影响流域地质安全,制约着流域生态保护和高质量发展,因此研究其孕灾机制十分必要。



兰恒星 教育部“长江学者”特聘教授,国家杰出青年基金获得者,“万人计划”科技创新领军人才,国际工程地质与环境协会滑坡专委会主席。从事多尺度岩土体变形破坏机理、灾害动力学过程模型与风险分析以及相关应用研究,先后主持黄河专项等国家自然科学基金重大项目,发表学术论文180余篇,其中SCI/EI论文100余篇。

然而,灾害是一个多因素共同作用的长期演化的产物^[11]。黄河流域地质构造活跃、地貌类型复杂、地貌演化过程迅速、气候分异特征显著,流域重大灾害多发,且具特殊性,使其成为全球重大灾害与地质、地貌、气候变化耦合研究的热点区域。地质过程方面,黄河流域地质构造活跃,中上游受青藏高原前缘部位控制,抬升速率快,新构造运动强烈,历史地震频繁,断层带分布密集,地层破碎程度高且风化

收稿日期:2021-02-19;修回日期:2021-08-12

* 通信作者,Email:lanhx@igsr.ac.cn

本文受到国家自然科学基金专项项目(42041006)的资助。

强烈;黄河流域下游构造沉降对河道形成、演化以及悬河产生了重要影响。地貌演化方面,黄河流域跨越多个地貌单元,从西到东横跨青藏高原、黄土高原、内蒙古高原和黄淮海平原等四个地貌单元,地形总高差超过 4 000 m,中上游以山地、峡谷为主,下游以平原为主,流域内河段差异性特征鲜明。气候变化方面,黄河流域气候分异显著,整个流域以降水补给为主,中上游多季节性降雨且集中,侵蚀搬运能力强;而下游河流泥沙搬运能力急剧减弱,沉积作用强,不同河段、不同灾种对气候响应的差异性明显。

现有研究表明,黄河流域地质过程、地貌演化和气候变化与流域重大灾害产生密切关联。如黄河流域上游高原隆升构造变形易造成流域重大灾害,每一次构造运动均发育大规模灾害效应^[12]。例如黄河上游共和运动阶段是区域崩滑流等灾害的高发期^[13];同时青藏高原抬升和高原冰雪融水造成黄河强烈下切,形成流域显著的地貌高差,地貌格局改变为流域干流区域重大灾害集中发育提供了充分的临空条件^[14];古气候的温暖湿润期和气候变化的快速转型造成降水集中,对流域重大灾害的发育也起着直接触发作用^[15]。虽然国内外学者围绕黄河流域地质—地貌—气候过程开展了长期深入的研究,但目前仍为“分段孤立”的研究现状^[16],流域地质、地貌、气候长时间序列耦合作用过程不清,缺少全流域过程联动的长时间序列重建,尚无流域尺度地质—地貌—气候全过程联动孕育重大灾害机制研究。

因此,开展流域尺度的地质—地貌—气候多过程相互作用研究,是揭示黄河流域重大灾害孕灾机制的前提,是保障黄河中上游诸多大型水电工程、下游大量城镇公共安全的基础,也是“黄河流域生态保护和高质量发展”重大国家战略实施亟需解决的地质安全问题。

2 黄河流域地质—地貌—气候相互作用及其孕灾机制研究现状与趋势

地质灾害是一个多因素共同作用下地球长期演化的产物^[11]。黄河流域地质过程活跃,地貌演化迅速,气候过程多变,因此灾害多发,且具有很强的特殊性。国内外学者针对黄河流域地质地貌及气候过程开展了长期深入的研究,主要研究进展和发展趋势如下:

2.1 黄河中上游地区地质过程研究现状与发展趋势

受印度板块持续向欧亚大陆推挤的影响,青藏

高原东北缘已成为世界上构造变形最强烈,活动断层分布最密集,地震活动最频繁的地区之一^[17, 18]。正是在青藏高原不断隆升的构造运动地质背景下^[12, 19],黄河中上游切开积石峡后不断向高原内部延伸^[20],形成了能够代表中上游宏观构造格局的典型盆—山耦合系统。黄河中上游这一典型区域的构造隆升与新构造运动时空演变过程,对河流形成发育与地貌演化产生了重大影响^[21],如晚中新世青藏高原持续、快速抬升,致使东北部系列前陆挤压盆地转变为山间盆地,形成现今的盆山耦合地貌格局^[22]。

目前这些代表性盆山演化与构造隆升过程的研究主要服务于青藏高原隆升时代和扩展模式的探讨^[23],而且与其主要断裂带的几何学与运动学特征研究严重脱节^[24—27],无法全面开展整个黄河中上游构造隆升和新构造运动的时空对比。另外,对主要断裂带的研究基本基于地貌记录的变形特征和破坏模式^[28],缺乏与古地震数据的关联对比研究^[29]。在此研究现状下,新生代中黄河中上游区域的代表性盆山系统与主要断裂带的构造活动特征认识还不足,难以支撑构建黄河中上游新构造运动的时空演变过程,更无法有效搭建与流域地质灾害间的联系^[30—32]。

因此,基于黄河上游区域已有的盆山演化历史、主要断裂带活动特征和古地震频率与幅度的研究成果,要想系统揭示黄河中上游构造隆升与新构造运动的时空演变过程及其对地貌的控制作用,亟需突破以下研究瓶颈:(1)黄河上游循化盆地、扎马杂日山、贵德盆地、瓦力贡山、共和盆地等新生代中代表性盆山的演化历史和过程需进一步完善。根据目前沉积地层年代学框架,重建的盆山演化过程仍存在较大的分歧,如对盆地构造回返的时代有不同认识,尤其在循化盆地这一问题尤为突出^[21, 33]。选择能够完整记录盆地演化历史的地层序列,并通过可测年范围适应性更好的宇生核素埋藏、暴露等时线测年法确定其结束时代,可能是解决该问题的有效途径;(2)对黄河中上游主要断裂带几何学与运动学特征研究需从线扩展至面。目前已开展的断裂几何学与运动学特征研究主要服务于独立断裂带的活动速率计算^[34—36],仍缺乏对不同断裂带活动特征的时空对比和关联研究^[37],从而无法搭建多构造带运动学的时空演化模式;(3)弥补黄河中上游古地震记录的研究空白。黄河中上游更长时空尺度的古地震研究不足,尤其缺乏在断层相互作用下整体区域古

地震复发行为和活动周期研究^[38],而这是进一步理解断裂带动力学和运动过程的重要基础^[39]。

综上所述,对黄河中上游构造隆升与新构造运动基本特征的认识不够深入,黄河中上游代表性盆地演化过程和重要断裂带的运动学特征研究相对薄弱,且与孕灾机制最为相关的新构造运动时空格局依然不清,难以为孕灾背景挖掘提供强有力的支撑。因此,面对黄河中上游复杂的地质构造环境,需要通过整合代表性盆地构造演化过程和主要断裂带的活动特征,结合相关古地震的活动周期分析,才能从根本上梳理流域构造隆升与新构造运动的时空演变过程,从而建立地质作用与地质灾害时空分布的对应关系,探讨灾害孕育环境与孕灾机制。

2.2 黄河中上游地貌演化过程研究现状与发展趋势

河流为一重要的地表过程,侵蚀、搬运和堆积作用串联着整个流域,其驱动流域地貌演化的同时,还伴生河谷内的崩滑流等地质灾害^[40]。

国际上典型河流流域,如北美密西西比河^[41]、南美亚马逊河(图2)、非洲尼罗河^[42]、南亚恒河^[43]等,其全流域形成发育历史和流域地貌演化过程已得到成功重建。在国内,虽然长江和黄河两大巨型河流某些河段的形成发育研究已取得了长足进步^[44-47],但仍然没有上升到通过关联上、中、下游发育历史来构建整个河流地貌演化过程的研究层面^[16]。例如:在综合考虑地貌和沉积记录的基础上,河流袭夺局地河湖系统致使黄河中游贯通的演化过程虽被成功重现^[48, 49],但同时上游水系也经历了重大调整^[16],它们彼此之间的过程联系仍不清楚。这不利于黄河中、上游形成发育和地貌演化过程的系统重建,也影响流域孕灾机制的科学分析。

目前,黄河流域盆地沉积和地貌记录研究表明,晚上新世东出青藏高原东北部的古水系格局仍然不明朗,而且“青东古湖”解体和黄河贯通循化、贵德与共和盆地的年代仍然有较大分歧,主要是围绕对积石峡至龙羊峡段黄河的形成过程以及流域盆地的切开时序问题^[10, 20, 50]。综合目前已有的成果,要想系统重建黄河上游的形成发育与地貌演化过程,亟需突破以下研究瓶颈:(1)形成发育的年代需要系统测定。对黄河上游关键河段形成历史的研究既有争议又有空白^[51],黄河上游一些关键河段形成历史的研究存在争议,例如贵德、共和段^[51];另一些河段几乎没有研究,如军功—玛曲的拉干峡段。主要原因在于不同河段发育历史差异大,单一测年方法无法

全覆盖^[20, 52],以及对黄河出现的标志认识不统一^[53];(2)形成发育过程与方式需集成研究。黄河上游贯通诸多盆地,其堆积时的水系格局在向现代深切河谷水系演化的重组过程不够明朗,致使出现外流水系袭夺、内流水系串联、洪泛淤积重组等多个不同的形成发育过程与方式的认知^[54, 55];在加强盆地间地貌记录对比的基础上,进一步研究河流沉积物特征和物源示踪信息是解决这一问题的关键;(3)不同河段下切速率研究需进一步强化。在缺乏上述年代框架的背景下,黄河上游不同河段阶地序列及其对比不够系统、详细^[56]。这一薄弱环节制约了获取高分辨率黄河下切速率的目标,更无法与流域地质灾害的时空分布对比,限制了灾害孕育机制研究的深化。

由上可见,黄河中上游形成发育与地貌演化过程研究亟需加强,尽管通过河流整体形成发育历史来刻画流域地貌演化过程已成为了发展趋势,但是黄河上游形成时代与过程仍不够明晰,导致难以重建中、上游联动的形成发育过程,给流域孕育重大地质灾害的地貌演化背景分析带来了巨大挑战。因此,亟需弥补上游形成发育研究方面的不足,搭建中上游演化过程之间的联系,深度细化黄河贯通后的下切速率变化,对比地质灾害时空分布,以揭示重大地质灾害孕育的地貌演化背景。

2.3 黄河中上游地质—地貌—气候相互作用与地质灾害时空分布研究现状与发展趋势

流域地质、地貌、气候过程本质上是一个长时间序列问题,这一过程贯穿于河流形成发展的始终,如权威期刊 *Science* 在 2010 发表文章表明,古亚马逊流域地质构造的演化对气候产生重要影响,进而改变流域地貌,重新配置流域格局^[57]。因此,从不同河段关联的角度重建整个河流形成发育历史,既是揭示流域孕灾机制的基础,也是研究流域地质地貌演化过程的新方向^[5, 58]。而黄河上游青藏高原隆升和新构造运动不仅对河流形成发育与地貌演化产生了重要影响^[16],且与流域内地质灾害联系密切^[5, 30, 59, 60],如黄河流域河谷两侧及其支流滑坡、泥石流、堰塞湖等地质灾害极为发育^[60]。

而地质灾害是一个多因素共同作用的长期演化产物^[11],灾害时空分布不仅与流域复杂地质地貌过程相关,而且与区域气候变化关系密切^[61, 62],同时还受诸如地震、融雪和异常气候等要素影响^[63]。青藏高原隆升造成地貌格局改变和古气候环境演变,且每一次构造运动均发育大规模灾害效应^[12],对黄

河上游古滑坡的触发作用起着至关重要的主导作用^[15]。例如:黄河上游共和运动阶段是区域崩滑流等灾害的高发期^[13];同时青藏高原抬升和高原冰雪融水造成黄河强烈下切形成流域显著的地貌高差,也为流域重大灾害集中发育提供了临空条件^[14];古气候的温暖湿润期和气候变化的快速转型造成降水集中,对流域重大灾害的发育也起着直接触发作用^[15],如第四纪期间气候存在显著的阶段性变化和周期性干湿变化^[64],此阶段黄河上游巨型滑坡发育密集^[6, 65]。因此,气候变化对灾害孕育有重要影响,但整体上目前关于气候变化对孕灾机制影响的研究还比较薄弱。

在流域地质灾害时空分布研究方面,尽管遥感影像解译在大区域或流域尺度地质灾害空间分布制图领域已被广泛应用^[66],并在近期发生的地质灾害时空分布调查方面表现出了突出优势^[67],然而对在黄河中上游构造抬升—强烈地震—极端降雨等内外营力复杂且长期的孕灾背景下,遥感影像解译却难以实现流域孕灾背景下多种地质灾害不同时空尺度的重构,导致地质灾害与地质—地貌—气候过程的多维关联分析研究难以取得突破性进展。

因此,基于目前已有成果和方法,重建黄河中上游地质灾害的时空分布及其与地质—地貌—气候的相互关系仍需要突破以下研究瓶颈:(1) 地质灾害群的解译方法亟需提升。由于黄河中上游覆盖范围大、强震多、降雨集中等特点,很难在大空间范围内开展大比例尺灾害解译成图,从而无法对其完整性进行有效评估^[66]。加之黄河中上游地震滑坡与降雨滑坡在影像数据上很难明确区分^[63],导致目前的技术手段在利用影像识别历史时期形成的地质灾害仍具多解性和不确定性。因此,解决灾害成因空间解译方法瓶颈仍是研究黄河中上游地质灾害研究的一项基本前提;(2) 不同流域尺度地质灾害规模统一划分标准有待合理化。黄河中上游地质灾害类型多样、规模差异大、密集化高,这需要根据黄河中上游地质地貌单元的区域特征分区,制定统一标准的地质灾害规模划分标准,特别需要加强历史强震与近代极端降雨诱发地质灾害空间分布的对比划分,通过空间地质灾害面密度来定量评估不同流域尺度的灾害规模仍是当前国际上关注的热点^[61, 68-71],也是目前需要进一步突破的难点;(3) 地质灾害空间分布的时间差异性重构有待加强。黄河上游各级阶地上诸如滑坡、堰塞湖等巨型地质灾害,中游各级支流密集遍布的黄土崩滑流灾害,形成时代差异明显,

需要结合地貌演化过程分析、古地震事件记录、典型地质灾害测年、历史文献记载等多方法多手段,对其进行准确的时空演化重建,但该方面研究仍然薄弱;(4) 地质灾害时空分布与地质—地貌—气候过程多维关联分析亟需深入。黄河中上游降雨或地震诱发的局部区域地质灾害、黄土高原滑坡灾害空间孕育机制研究已有不少成果^[63, 72],但目前研究仍缺少地质灾害空间分布时序演化与地质—地貌—气候过程多维关联分析,对较长时间尺度的地质—地貌—气候耦合孕灾机制研究十分薄弱。

由上可见,黄河中上游地质灾害的时空分布及其与地质—地貌—气候的相互关系研究比较薄弱,难以量化黄河中上游复杂环境下地质灾害空间分布诱因和时间差异性,限制了地质灾害与地质—地貌—气候过程的多维关联分析。因此,针对黄河中上游地质—地貌—气候多过程相互作用及其孕灾机制,亟需提升遥感影像对不同诱因地质灾害的差异性解译方法技术水平,并在区域地质构造、地貌演化、气候变化耦合孕灾研究基础上,建立区域地质灾害事件发生的时空演化数据库,实现对黄河流域地质灾害时空分布规律及其与地质—地貌—气候的相互关系和关联的多维度分析。

2.4 黄河流域下游洪灾与中上游气候和巨型灾害的关系研究

黄河下游地势平缓,下游河道比降低致使河道持续淤积,以至决口、溃堤、改道等灾害频繁发生^[73]。据记载,先秦到解放前的 2 500 多年里,黄河共决溢 1 500 多次,改道 26 次,三年两决口、百年一改道^[8]。当今全球气候不断变化的背景下,*Nature* 发文预测 2080 年黄河流域的平均气温将会比全球同纬度其他流域增幅更高,而由此带来的影响是黄河流域下游面临的洪水风险加剧,将威胁区域内人民生命安全和经济社会可持续发展^[73]。因此,洪水灾害的触发过程及形成机制等问题已成为国际研究关注的科学焦点。而国际上对这些问题的研究,以往仅单一关注流域气候急剧波动对河流下游灾害的触发作用^[74]。如今,以地球系统科学为指引,将河流上下游关联起来,综合考虑上游发生的巨型地质灾害如何对下游产生影响^[75],这一新思路已经成为探讨下游灾害成因的最新发展趋势。

秉承这一研究思想,已有研究发现,大江大河上游发生的大型滑坡、泥石流、冰川跃动、水系袭夺重组等快速地质和地貌过程能够直接导致河道主槽迁

移,使河流产生形态上的变化^[31, 43],最终可能引发下游改道、溃堤等洪水等灾害^[76]。研究表明,巨型灾害的链生效应对流域下游很远区域产生巨大的影响^[77],例如汶川地震诱发的唐家山堰塞湖、雪融诱发的白格滑坡堰塞湖等,在其溃决后所产生的洪水对下游造成了巨大影响,印证了大型河流中地质灾害级联效应的巨大危害^[78, 79]。再如黄河上游巨型滑坡灾害频繁^[2, 3],近年 Wu 等^[5]研究认为黄河上游戈龙布滑坡历史上造成的堰塞湖溃决大洪水,对流域下游史前人类聚居地产生了毁灭性破坏,并提出了黄河下游级联洪灾效应的假说。虽然对这个假说还有许多争议^[80-82],但流域尺度巨型灾害的级联效应仍是当前研究的热点。然而,整体上黄河流域的相关研究仍比较薄弱,以往研究仅单一关注流域气候急剧波动对河流下游灾害的触发作用^[74]。

因此,以地球系统科学为指引,将河流上、中、下游联动起来是探讨流域灾害成因的最新发展趋势^[75]。从目前已有关于黄河下游决口、改道等研究资料来看,其记录的时间尺度仅停留在历史时期,短于流域气候变化和中上游地质灾害发生的时间尺度^[5, 83]。因此,要深化上述黄河流域灾害联动方面研究,亟需突破面临的以下挑战:(1) 亟需将下游决口、改道的历史记录向地质记录延伸。下游决口、改道一般能够留下直接的沉积记录,但目前已有的钻孔岩芯多服务于地质勘探,无法有效捕捉这些事件,更缺乏精准的年代框架以及沉积、物源特征指标分析^[84];(2) 需将钻孔岩芯反映的沉积信息向断面扩展。由于决口、改道的多发性和多点性,即使多钻孔岩芯对比也很难建立起它们完整的发生序列。将岩芯的沉积信息与地球物理勘探剖面结合是解决这一问题的有效手段^[85];(3) 决口、改道的历史记录需重新厘定。黄河下游流经不同行政区域,目前各地方志对黄河决口、改道的记载存在一定偏差^[86],而且历史地理学对这方面的研究还在一定程度上混入了人工渠记录^[86];(4) 缺乏与中上游气候和巨型灾害对比的纽带。除根据年代框架开展下游决口、改道的发生序列与流域气候变化和中上游巨型灾害间的对比外,如何建立起上、中、下游灾害间的实际物质联系可能是揭示下游决口、改道触发过程和原因所面临的重大技术瓶颈。近年来,碎屑的破裂年龄以及物源示踪方法的发展为该问题的突破提供了可能^[87]。

由此可见,黄河下游决口、改道记录的时间尺度短,且其与中上游气候和巨型灾害的关系研究薄弱,难以支撑上中游与下游巨灾过程联动认识的深化。要想查明黄河下游决口、改道的触发因素和过程,首先需要建立完整且连续的地质和历史记录,之后在年代框架的约束下将其与气候变化记录和中上游巨型灾害记录作对比,厘清之间有效物质联系,有望在黄河流域尺度上地质—地貌—气候联动孕灾机制研究方面取得理论突破。

3 黄河流域地质—地貌—气候相互作用及其孕灾机制研究发展趋势

黄河流域横跨世界上最年轻的青藏高原、正在堆积的黄土高原和正在沉降的华北平原,流域地质过程复杂、地貌演化迅速、气候分异显著。青藏高原隆升控制着黄土高原的地貌演化过程,也影响着华北平原的持续沉降、堆积和变形,同时青藏高原的隆升及其远程效应制约着流域地质环境、水环境、气候环境和生态环境的变化。黄河流域上游段重大地质灾害发生受青藏高原隆升变动的影 响,黄河中游黄土高原地貌过程演化迅速也深刻地影响着灾害发生和演化。因此,黄河流域跨越的重要地貌单元如何相互关联并孕育重大灾害一直都是地学界关注的前沿科学研究方向。

国内外学者围绕这些科学问题开展的长期深入研究,虽然在揭示流域构造隆升对地貌的控制作用,重建流域地貌形成发育和演化过程,重建构造—气候耦合作用下的孕灾过程等方面成果较丰硕(图 1)。但关于黄河流域地质—地貌—气候作用过程及其耦合孕灾机制的研究仍为“分段孤立”的现状,缺少从地质—地貌—气候多过程互馈、重大灾害全流域尺度过程联动的角度,系统研究流域的地质—地貌—气候相互作用及其孕灾机制;严重限制了在流域尺度上对河流侵蚀、搬运、堆积时序重建的精度,也严重影响了对流域重大灾害孕灾机制分析的系统科学性。尽管分河段的孤立研究有利于同特征河段和同类型灾害孕灾机理的认识,但是对于作为一个整体的巨型河流系统,全流域地质—地貌—气候过程、不同灾害之间,存在强烈的相互作用。因此,从“贯不通、联不上”的孤立研究走向“地质—地貌—气候多过程互馈、重大灾害上中下游联动”的系统研究是当前相关研究的发展趋势。

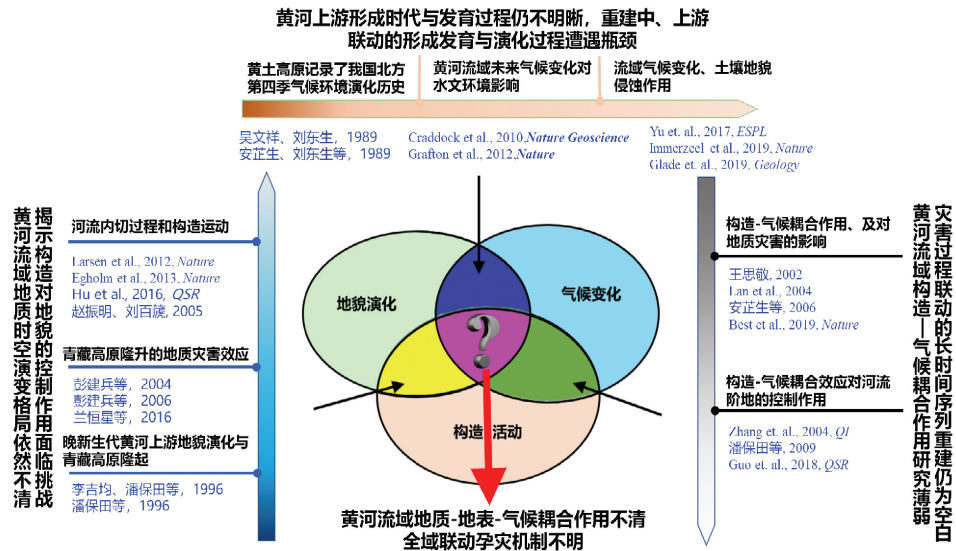


图 1 黄河流域地质—地貌—气候作用及孕灾机制研究脉络

4 黄河流域地质—地貌—气候相互作用及其孕灾机制研究关键科学问题

黄河流域重大灾害是地球深部过程与人类活动强烈影响的地球表层动力系统相互作用与转化的产物,深部地质过程、地表地貌演化、气候变化耦合联动孕育着重大灾害。流域地质、地貌、气候过程相互关联,重大灾害类型差异明显、相互联动,如上游青藏高原隆升和新构造运动对河流形成发育与地貌演化产生了重大影响,是流域巨型滑坡孕育的场所;中游地貌演化迅速、地貌类型多样、气候分异显著,导致水土灾害频发;下游改道、溃堤洪水等灾害和中上游巨型灾害间联系密切,灾害效应范围广、影响久。

由此可见,黄河流域地质—地貌—气候过程及其孕灾机制研究是一个系统性科学问题,针对当前黄河流域地质、地貌、气候过程“时序重建困难”及其“联动孕灾机制不清”的研究热点与学术前沿难点,需以地球系统科学理念为基础,从流域系统整体出发,揭示地球圈层相互作用下黄河流域“大区域范围、长流域跨度、长时间序列”的重大灾害孕育机制。为此,亟需从黄河上、中、下游联动角度,通过地质—地貌—气候相互作用研究,阐明流域地质、地貌、气候长时间序列耦合作用过程,建立流域重大灾害时空分布规律,揭示黄河流域地质—地貌—气候多过程相互作用下的耦合孕灾机制,重建全流域重大灾害的联动过程。

为解决以上关键科学问题,首先需要明晰地质过程(百万年计)—地貌过程(十万年计)—气候过程(万年计),梳理流域构造隆升与新构造运动的时空演变过程,认清其对地貌的控制作用,重建黄河中上

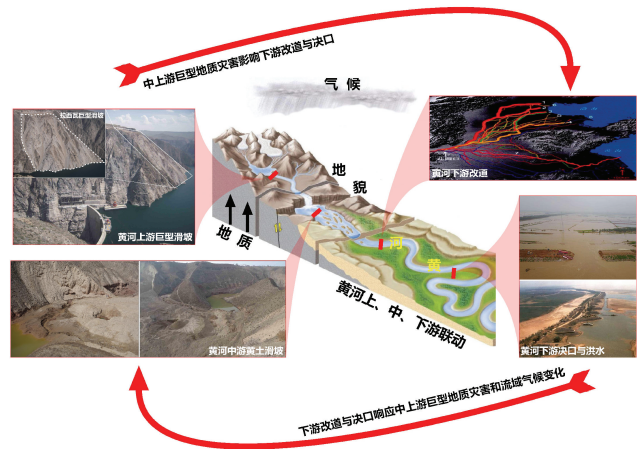


图 2 黄河流域地质—地貌—气候多过程互馈、重大灾害全流域联动

游形成发育历史与地貌演化过程;其次需要厘清如何利用地球系统科学思维及理念,建立黄河流域地质、地貌、气候相互作用与重大灾害响应时序,建立河流发育与重大灾害时空分布的对应关系,并基于过程联动思想,建立上中下游之间有效的物质联系,突破流域“多过程互馈、上中下游联动”的孕灾机制研究难点。

5 黄河流域地质—地貌—气候相互作用及其孕灾机制研究建议

黄河流域穿越不同地质地貌单元,承受复杂的多圈层相互作用,历经地质、地貌过程与气候变化复杂过程的互馈影响,导致流域上、中、下游多过程相互作用的地质灾害孕育过程及机制差异显著,是系统开展流域地质—地貌—气候“多过程互馈、上中下游联动”孕灾机制研究的理想区域(图 2),有望从流

域尺度实现地球系统科学研究方面的理论突破。因此,针对黄河流域地质—地貌—气候相互作用及其孕灾机制研究的复杂性,提出如下研究建议:

(1) 首先,需要以“地质—地貌—气候多过程互馈、重大灾害流域上中下游联动”的地球系统科学思想为指导,重建多时空尺度流域地质—地貌—气候的演变历史,分析黄河中上游地质和地貌演变的时空格局,综合区域已有的气候记录,重建地质—地貌—气候耦合联动的长时序作用过程;(2) 其次,需要查清流域中上游重大灾害的时空分布规律,构建长时间尺度的地质灾害数据库,并建立重大灾害与地质—地貌—气候演变过程的关联。需精确提取黄河下游决口、改道的地质和历史记录,探讨与中上游气候变化和重大灾害的响应关系,打破“分段分要素孤立”的研究局面,从流域尺度上揭示地质—地貌—气候的耦合互馈过程及重大灾害的联动关系;(3) 最后,在上述研究基础上,突破流域“地质—地貌—气候多过程互馈、重大灾害上中下游联动”难题,从“重建历史—聚焦现代—展望未来”的时间轴尺度全面揭示黄河全流域的地质、地貌与气候耦合孕灾机制。

参 考 文 献

- [1] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究. 地球科学进展, 2004, 19(3): 443—450.
- [2] 周保, 彭建兵, 殷跃平, 等. 黄河上游拉干峡—寺沟峡段特大型滑坡及其成因研究. 地质论评, 2014, 60(1): 138—144.
- [3] 殷志强, 黄河上游滑坡泥石流时空演化及触发机制. 北京: 科学出版社, 2016.
- [4] 吴庆龙, 张培震, 张会平, 等. 黄河上游积石峡古地震堰塞溃决事件与喇家遗址异常古洪水灾害. 中国科学: 地球科学, 2009(8): 1148—1159.
- [5] Wu QL, Zhao ZJ, Liu L, et al. Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty. *Science*, 2016, 353(6299): 579—582.
- [6] 彭建兵, 段钊. 听黄土粒儿说滑坡. 自然杂志, 2018, 40(4): 285—289.
- [7] Zhuang JQ, Peng JB, Xu C, et al. Distribution and characteristics of loess landslides triggered by the 1920 Haiyuan Earthquake, Northwest of China. *Geomorphology*, 2018, 314(1): 1—12.
- [8] Tian SM, Wang WH, Xie BF, et al. Fluvial processes of the downstream reaches of the reservoirs in the Lower Yellow River. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(9): 1321—1336.
- [9] 沈怡, 赵世暹, 郑道隆. 黄河年表. 北京: 原军事委员会资源委员会, 1935.
- [10] Wang YJ, Su YJ. The geo-pattern of course shifts of the Lower Yellow River. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(6): 1019—1036.
- [11] Cruden D, Lan HX. Using the working classification of landslides to assess the danger from a natural slope. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2015, 2: 3—12.
- [12] 赵振明, 刘百箴. 青海共和至甘肃兰州黄河河谷地貌的形成与青藏高原东北缘隆升的关系. 西北地质, 2003, 36(2): 1—12.
- [13] 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等. 青藏高原隆升的地质灾害效应. 地球科学进展, 2004, 19(3): 457—466.
- [14] 李小林, 郭小花, 李万花. 黄河上游龙羊峡—刘家峡河段巨型滑坡形成机理分析. 工程地质学报, 2011, 19(4): 516—529.
- [15] 殷志强, 魏刚, 秦小光, 等. 青藏高原东北缘黄河上游滑坡与堰塞湖研究进展. 地学前缘, 2021, 28(2): 46—57.
- [16] 潘保田, 李吉均, 曹继秀, 等. 化隆盆地地貌演化与黄河发育研究. 山地研究, 1996(3): 153—158.
- [17] 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程. 中国科学(地球科学), 2013, 43(10): 1607—1620.
- [18] Yuan DY, Ge WP, Chen ZW, et al. The growth of northeastern Tibet and its relevance to large-scale continental geodynamics: A review of recent studies. *Tectonics*, 2013, 32: 1358—1370.
- [19] 赵无忌, 殷志强, 马吉福, 等. 黄河上游贵德盆地席茨滩巨型滑坡发育特征及地貌演化. 地质论评, 2016, 62(3): 709—721.
- [20] Craddock WH, Kirby E, Harkins NW, et al. Rapid fluvial incision along the Yellow River during headward basin integration. *Nature Geoscience*, 2010, 3(3): 209—213.
- [21] Guo XH, Forman SL, Marin L, et al. Assessing tectonic and climatic controls for Late Quaternary fluvial terraces in Guide, Jianzha, and Xunhua Basins along the Yellow River on the northeastern Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 195: 109—121.
- [22] Craddock WH, Kirby E, Zhang H, et al. Rates and style of Cenozoic deformation around the Gonghe Basin, northeastern Tibetan Plateau. *Geosphere*, 2014, 10(6): 1255—1282.
- [23] Jia LY, Hu DG, Wu HH, et al. Yellow River terrace sequences of the Gonghe-Guide section in the northeastern Qinghai-Tibet: implications for plateau uplift. *Geomorphology*, 2017, 295: 323—336.
- [24] Van Der Woerd J, Tapponnier P, Ryerson FJ, et al. Uniform postglacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun Fault (Tibet), from Al-26, Be-10, and C-14 dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(3): 356—388.

- [25] Zhang PZ, Shen ZK, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 2004, 32(9): 809—812.
- [26] Mériaux AS, Tapponnier P, Ryerson FJ, et al. The Aksay segment of the northern Altyn Tagh fault: Tectonic geomorphology, landscape evolution, and Holocene slip rate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(4): 1—32.
- [27] Hu ZB, Pan BT, Wang JP, et al. Fluvial terrace formation in the eastern Fenwei Basin, China, during the past 12 Ma as a combined archive of tectonics and climate change. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 60: 235—245.
- [28] Su Q, Ren ZK, Zhang HP, et al. The role of the Haiyuan Fault in accelerating incision rate of the Yellow River at the Mijia Shan Area, northeastern Tibetan Plateau, as revealed by in-situ Be-10 dating. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 179: 276—286.
- [29] Guo YQ, Huang CC, Pang JL, et al. Palaeo-earthquake and palaeo-mudflow events at the Machangyuan Ruins in the Huangshui River valley, northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Holocene*, 2016, 26(8): 1208—1224.
- [30] 彭建兵, 马润勇, 邵铁全. 构造地质与工程地质的基本关系. *地学前缘*, 2004, 11(4): 535—549.
- [31] Larsen IJ, Montgomery DR. Landslide erosion coupled to tectonics and river incision. *Nature Geoscience* 2012, 5(7): 468—473.
- [32] Penna IM, Hermanns RL, Niedermann S, et al. Multiple slope failures associated with neotectonic activity in the Southern Central Andes (37 degrees-37 degrees 30'S), Patagonia, Argentina. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123: 1880—1895.
- [33] Han F, Zhang KX, Ji JL, et al. Late Pleistocene sedimentary sequences and paleoclimate changes in Xunhua basin in the upper reach of Yellow River in China. *Frontiers of Earth Science*, 2012, 6(3): 297—305.
- [34] Harkins N, Kirby E. Fluvial terrace riser degradation and determination of slip rates on strike-slip faults: an example from the Kunlun fault, China. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35, L05406.
- [35] Duvall AR, Clark MK. Dissipation of fast strike-slip faulting within and beyond northeastern Tibet. *Geology*, 2010, 38(3): 223—226.
- [36] Zhu LY, Ji LY, Jiang FY. Variations in locking along the east Kunlun fault, Tibetan Plateau, China, using GPS and leveling data. *Pure and Applied Geophysics*, 2020, 177(1): 215—231.
- [37] Kirby E, Harkins N, Wang EQ, et al. Slip rate gradients along the eastern Kunlun fault. *Tectonics*, 2007, 26(2). <https://doi.org/10.1029/2006TC002033>.
- [38] Liang K, Sun CB, Ma BQ, et al. Investigation of the Yellow River buried fault in the Wuhai basin, northwestern Ordos Block, China, using deep/shallow seismic reflection and drilling techniques. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 163: 54—69.
- [39] Lasserre C, Morel PH, Gaudemer Y, et al. Postglacial left slip rate and past occurrence of $M \geq 8$ earthquakes on the western Haiyuan fault, Gansu, China. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 1999, 104(B8): 17633—17651.
- [40] Egholm DL, Knudsen MF, Sandiford M. Lifespan of mountain ranges scaled by feedbacks between landsliding and erosion by rivers. *Nature*, 2013, 498(7455): 475—478.
- [41] Blum M, Pecha M. Mid-Cretaceous to Paleocene North American drainage reorganization from detrital zircons. *Geology*, 2014, 42(7): 607—610.
- [42] Faccenna C, Glisovic P, Forte A, et al. Role of dynamic topography in sustaining the Nile River over 30 million years. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 1012—1017.
- [43] Clift D, Blusztajn J. Reorganization of the western Himalayan river system after five million years ago. *Nature*, 2005, 438: 1001—1003.
- [44] Pan BT, Hu ZB, Wang JP, et al. A magnetostratigraphic record of landscape development in the eastern Ordos Plateau, China: Transition from Late Miocene and Early Pliocene stacked sedimentation to Late Pliocene and Quaternary uplift and incision by the Yellow River. *Geomorphology*, 2011, 125: 225—238.
- [45] Pan BT, Hu ZB, Wang JP, et al. The approximate age of the planation surface and the incision of the Yellow River. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2012, 356: 54—61.
- [46] Zheng H, Clift P, Wang P, et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(19): 7556—7561.
- [47] Hu ZB, Pan BT, Bridgland D, et al. The linking of the upper-middle and lower reaches of the Yellow River as a result of fluvial entrenchment. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 166: 324—338.
- [48] Hu ZB, Pan BT, Guo LY, et al. Rapid fluvial incision and headward erosion by the Yellow River along the Jinshaan gorge during the past 1.2 Ma as a result of tectonic extension. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 133: 1—14.
- [49] Hu ZB, Li MH, Dong ZJ, et al. Fluvial entrenchment and integration of the Sanmen Gorge, the Lower Yellow River. *Global and Planetary Change*, 2019, 178: 129—138.
- [50] Zhang HP, Kirby E, Pitlick J, et al. Characterizing the transient geomorphic response to base-level fall in the northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(2): 546—572.

- [51] Perrineau A, van der Woerd J, Gaudemer Y, et al. Incision rate of the Yellow River in Northeastern Tibet constrained by ^{10}Be and ^{26}Al cosmogenic isotope dating of fluvial terraces: implications for catchment evolution and plateau building. *Growth and Collapse of the Tibetan Plateau: Geological Society Special Publication*, 2011, 353: 189—219.
- [52] Pan Bt, Su H, Hu ZB, et al. Evaluating the role of climate and tectonics during non-steady incision of the Yellow River: evidence from a 1.24 Ma terrace record near Lanzhou, China. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28: 3281—3290.
- [53] Nie J, Steven T, Rittner M, et al. Loess Plateau storage of Northeastern Tibetan Plateau-driven Yellow River sediment. *Nature Communications*, 2015, 6, 8511.
- [54] 赵振明, 刘百箴. 对龙羊峡形成的初步认识. *西北地质*, 2005, 38(2): 24—32.
- [55] Zhang XP, Fang XQ. Temporal and spatial variation of catastrophic river floodings in the Lower Yellow River from AD 960 to 1938. *The Holocene*, 2017, 27(9): 1359—1369.
- [56] Harkins N, Kirby E, Heimsath A, et al. Transient fluvial incision in the headwaters of the Yellow River, northeastern Tibet, China. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(F3): 3—4.
- [57] Hoorn C, Wesselingh F, Steege H, et al. Amazonia through time: andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity. *Science*, 2010, 330: 927—931.
- [58] Constantine JA, Dunne T, Ahmed J, et al. Sediment supply as a driver of river meandering and floodplain evolution in the Amazon Basin. *Nature Geoscience*, 2014, 7(12): 899—903.
- [59] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究. *沉积学报*, 2009, 27(2): 343—351.
- [60] Xu XZ, Guo WZ, Liu YK, et al. Landslides on the Loess Plateau of China: a latest statistics together with a close look. *Natural Hazards*, 2017, 86(3): 1393—1403.
- [61] Guzzetti F, Cardinali M, Reichenbach P. The influence of structural setting and lithology on landslide type and pattern. *Environmental & Engineering Geoscience*, 1996, 2(4): 531—555.
- [62] Dikau R, Schrott L. The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC): Main objectives and results. *Geomorphology*, 1999, 30(1/2): 1—12.
- [63] Xu YR, Allen MB, Zhang WH, et al. Landslide characteristics in the Loess Plateau, northern China. *Geomorphology*, 2020, 359: 1—12.
- [64] Nie JS, Stevens T, Song YG, et al. Pacific freshening drives Pliocene cooling and Asian monsoon intensification. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5474.
- [65] 殷志强. 黄河上游因人工加载和降雨引发的虎头崖滑坡. *中国地质灾害与防治学报*, 2014, 25(4): 10.
- [66] Guzzetti F, Mondini AC, Cardinali M, et al. Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 2012, 112(1-2): 42—66.
- [67] Fan XM, Scaringi G, Korup O, et al. Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms, and impacts. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(2): 421—503.
- [68] Wright RH, Campbell RH, Nilsen TH. Preparation and use of isopleth maps of landslide deposits. *Geology*, 1974, 2(10): 483—485.
- [69] Keefer D. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, 95(4): 406—421.
- [70] Larsen IJ, Montgomery D, Korup O. Landslide erosion controlled by hillslope material. *Nature Geoscience*, 2010, 3(4): 247—251.
- [71] Malamud BD, Turcotte DL, Guzzetti F, et al. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29(6): 687—711.
- [72] Peng JB, Ma PH, Wang QY, et al. Interaction between landsliding materials and the underlying erodible bed in a loess flowslide. *Engineering Geology*, 2018, 234: 38—49.
- [73] Phillips CB, Jerolmack DJ. Self-organization of river channels as a critical filter on climate signals. *Science*, 2016, 352(6286): 694—697.
- [74] Bloeschl G, Hall J, Viglione A, et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 2019, 573(7772): 108—111.
- [75] Cook KL, Andermann C, Gimbert F, et al. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya. *Science*, 2018, 362(6410): 53—57.
- [76] Valenza J, Edmonds D, Hwang T, et al. Downstream changes in river avulsion style are related to channel morphology. *Nature Communication*, 2020, 11(1): 2116.
- [77] Kirschbaum D, Watson C, Rounce D, et al. The state of remote sensing capabilities of cascading hazards over high mountain Asia. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7: 197.
- [78] 陈晓清, 崔鹏, 赵万玉, 等. “5·12”汶川地震堰塞湖应急处置措施的讨论—以唐家山堰塞湖为例. *山地学报*, 2010, 28(3): 350—357.
- [79] Fan XM, Xu Q, Alonso-Rodriguez A, et al. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: prime investigation, early warning, and emergency response. *Landslides*, 2019, 16(5): 1003—1020.
- [80] Montgomery DR. Emperor Yu's Great Flood. *Science*, 2016, 353: 538—539.
- [81] Wu QL, Zhao ZJ, Liu L, et al. Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty. *Science*, 2016, 353(6299): 579—582.

- [82] Dong GH, Zhang FY, Liu FW, et al. Multiple evidences indicate no relationship between prehistoric disasters in Lajia site and outburst flood in upper Yellow River valley, China. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(4): 441—449.
- [83] 许清海, 阳小兰, 郑振华, 等. 黄河下游河道变迁与河道治理. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(5): 77—80.
- [84] 刘书丹, 李广坤, 李玉信, 等. 从河南东部平原第四纪沉积物特征探讨黄河的形成与演变. *河南地质*, 1988, 6(2): 20—24.
- [85] Liu J, Saito Y, Wang H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea. *Marine Geology*, 2007, 236: 165—187.
- [86] 徐福龄. 黄河下游明清时代河道和现行河道演变的对比研究. *人民黄河*, 1979(1): 66—76.
- [87] Li L, Chen J, Hedding DW, et al. Uranium isotopic constraints on the nature of the prehistoric flood at the Lajia site, China. *Geology*, 2020, 48(1): 15—18.

Research on Multi Process Interaction of Geology, Geomorphology and Climate in the Yellow River Basin and Its Gestation Mechanisms on Major Disasters

Lan Hengxing^{1,2*} Zhu Yanbo¹ Li Langping² Pan Baotian³ Hu Zhenbo³ Peng Jianbing¹

1. *School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064*

2. *State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*

3. *College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000*

Abstract The Yellow River basin is characterized by active geological tectonics, rapid geomorphological evolution, distinct climatic heterogeneity and frequent occurrence of major disasters. In the Yellow River basin, the geological, geomorphological and climatic processes are complicatedly interrelated, and major disasters are also interconnected. At present, researches on the geological, geomorphological and climatic processes in the Yellow River basin are still almost “isolated”. There is a lack of systematic study at a basin scale on the interactions among the geological, geomorphological and climatic processes, and their disaster gestation mechanism. This paper firstly discusses the current state-of-the-art researches on the geological, geomorphological and climatic processes, and the temporal and spatial distributions of major disasters in the Yellow River basin. Next, this paper points out the future trends and challenges associated with researches on the gestation mechanism of major disasters in the Yellow River basin. The mutual interactions among the geological, geomorphological and climatic processes and their gestation mechanisms on major disasters are suggested to be the fundamental scientific problem. Finally, several suggestions on future researches are given for solving this fundamental scientific problem.

Keywords Geological process; geomorphological evolution; climate change; interlinkage process; disaster gestation mechanism

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: lanhx@igsr.ac.cn