

# 川西北高原地貌垂直地带性及山地灾害对南水北调西线工程的影响

张信宝<sup>1,2</sup>, 吴积善<sup>1</sup>, 汪阳春<sup>1</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075)

**摘要:** 川西北高原地貌垂直地带性明显; 现在流水地貌带海拔高度 < 3800m; 冰缘地貌带为 3800~4200m; 冰川地貌带 > 4200m; 相应的主导地貌过程分别是流水侵蚀、冻融侵蚀和冰川侵蚀。川西北高原是大面积构造隆升背景下冻融侵蚀形成的夷平地貌, 花岗岩和石灰岩等结晶岩抗寒冻风化能力强, 三叠系砂板岩, 抗寒冻风化能力差, 前者可以形成冰川发育的高山, 后者为融冻地貌等发育的丘状起伏的高原面。南水北调西线一期工程主要位于流水地貌带与冰缘地貌带的交界地带, 滑坡、崩塌、融冻土流是工程沿线的主要斜坡灾害, 规模多为中小型。工程沿线地区泥石流沟数量多、规模小, 但流水地貌带内的部分沟谷可能有大型泥石流发生。融冻土流是该区河流泥沙的主要来源, 侵蚀产沙对水库淤积的影响应引起重视。冰缘地貌和流水地貌的交错带部位, 地貌过程对气候变化的响应相当敏感。

**关键词:** 南水北调; 西线工程; 川西北高原; 地貌垂直地带性; 山地灾害

文章编号: 1000-0585(2006)04-0633-08

## 1 引言

南水北调西线一期工程(简称工程)穿越川西北高原, 引雅砻江支流泥曲、达曲和大渡河支流阿柯河、麻尔曲、杜柯河之水, 经支流贾曲注入黄河, 由“5 坝 7 洞 1 渠”组成, 引水线路全长 260km(图 1)。五个引水枢纽工程的位置、特征值和调水量见表 1。五条河流多年平均总径流量 60.7 亿 m<sup>3</sup>, 计划调水量 40.0 亿 m<sup>3</sup>。五个枢纽工程的坝高介于 63~123m, 库容介于 0.64~7.08 亿 m<sup>3</sup>, 总库容 19.14 亿 m<sup>3</sup>。7 条引水隧洞总长 244km, 泥曲至杜柯河段的隧洞最长, 73km。洞线一般埋深在 300~600m。洞径由达曲入口的 5m, 逐步扩大到阿柯河出口时的 9.6m。1 条渠道为沿贾曲至黄河的长 16km 的明渠<sup>[1, 2]</sup>。滑坡、泥石流等山地灾害为地貌灾害, 科学解释川西北高原的地貌特征和演化过程, 显然有助于认识这些灾害的分布规律和活动特点, 及其对南水北调西线一期工程的影响。

川西北高原位于青藏高原的东北缘, 为山原地貌, 地势起伏和缓, 高原面海拔 4000m 左右。柴宗新, 穆桂春等人均用传统的夷平面理论解释川西高原面的形成, 认为上新世末以来, 川西地区强烈上升, 早第三纪准平原抬升到 4000~5000m 的高度, 形成了川西高原<sup>[3, 4]</sup>。国内学者一般认为, 第四纪以来上新世准平原的强烈隆升形成了现今的青藏高原, 并用隆升前准平原地面高度和现今高原地面高度的差异, 计算隆升幅度, 且不考虑地

收稿日期: 2005-09-12; 修订日期: 2006-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40271015); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-323)

作者简介: 张信宝(1946-), 男, 江苏镇江人, 研究员。主要从事水土保持和土壤侵蚀研究。Email: zxbao@imde.ac.cn



植被。流石滩地面岩石碎屑裸露，土壤未发育。(5) 高山冰雪带。海拔 5200m 雪线以上，发育有现代冰川。从冰川冻土发育的角度，以上 5 个自然垂直带可合并为 3 个带：(1) 海拔 3800m 以下的非冻土带；(2) 海拔 3800~4200m 的多年冻土带；(3) 海拔 4200m 以上的新老冰川带。其中海拔 5200m 的雪线以上，现代冰川发育，冰川舌向下伸延到 4600m；海拔 4200~5200m 的山地，古冰斗、角峰、冰川湖、冰碛物等古冰川遗迹比比皆是，表明曾有第四纪古冰川发育。

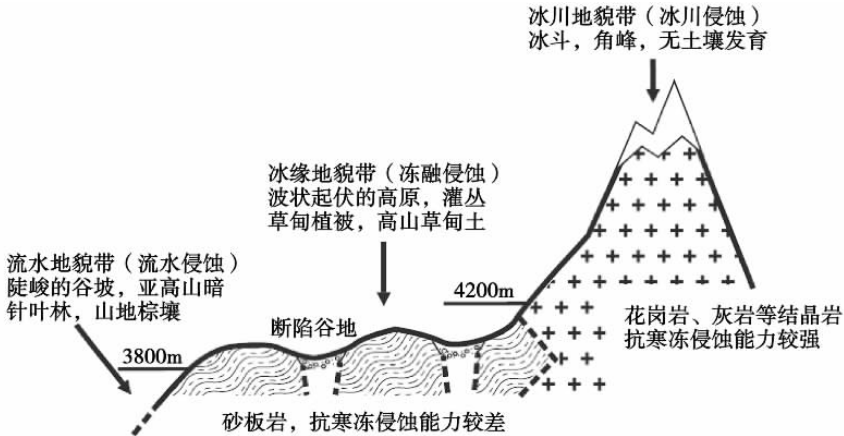


图 2 川西北高原地貌垂直分带示意图

Fig. 2 Vertical geomorphologic zoning of the Northwest Sichuan Plateau

相应于植被、土壤和冰川冻土的垂直地带性<sup>[17~19]</sup>，川西北高原的地貌也具有明显的垂直地带性：流水地貌带，海拔 3800m 以下；冰缘地貌带，海拔 3800~4200m；冰川地貌带，海拔 4200m 以上（图 2）。由于基带气候存在一定差异，川西北高原各地不同地貌带的高程与以上高程略有差异。高原面上为典型的冰缘地貌，地面丘状起伏，丘坡较缓，多小于 20 度。谷坡发育有高山草甸土，土层薄，40cm 左右。由于气候寒冷，有机质分解和淋溶不显著，表层 0~15cm 为富含粗腐殖质的根系盘结的灰黑色生草层；15cm 以下为黄棕色角砾质土。角砾质土层以下为寒冻风化角砾层和破碎岩石带，两者呈过渡状，有时难以区分。川西北高原广泛分布的三叠系浅变质砂板岩，多为中薄层，构造破碎较强烈，节理发育，寒冻风化角砾和破碎岩块多呈板片状，长、宽 20~30cm，厚 5cm 左右的居多。风化角砾层内的孔隙和破碎岩石带的裂隙内均含土状物质，含量随深度增加而减少。多年冻土层深达数米，其中 0.4~1.5m 以上为季节性冻土，冬季冻结，夏季融化。高原面上水系为鲜水河、大渡河的上游，河谷下切较浅，岭谷高差多小于 500 m，谷底较宽阔平坦，河谷最宽处达 6000~8000 米，河道弯曲，水流散漫。河谷内埋藏阶地和堆积阶地发育，阶地组成为分选较差的砂砾层，砾石多为未磨圆的板片状角砾，有人认为是冰水沉积<sup>[20~22]</sup>。一些排水不畅的宽阔河谷盆地，地面积水，生长大量沼泽植物，发育有沼泽土。冰缘地貌带(高原面)以下为流水地貌带，河谷深切，谷底狭窄，谷坡陡峻，多大于 35 度。河谷内基座阶地发育，随着河流的延伸，砾石逐渐磨圆。冰缘地貌带(高原面)以上为冰川地貌带。工程沿线地区仅四川阿坝和青海班玛交界处的年宝玉则雪山有现代冰川发育，最高峰海拔 5369m，山体组成为花岗岩。年宝玉则雪山海拔 5200m 雪线以上，花岗岩角峰陡立，冰斗内冰雪常年不化。雪线以下山地虽无现代冰川发育，但冰斗、角峰、冰碛物等冰川遗迹表明，第四纪曾有古冰川发育，当时 U 型谷地内冰川蜿蜒，冰川末端侧碛垄、终碛垄

等冰碛物分布广泛,并发育有冰川湖。冰斗和冰川谷地的基岩陡崖,物理寒冻风化强烈,岩屑锥发育。工程沿线地区主要河流的分水岭高度多介于 4500~5000m 之间,虽无现代冰川发育,但冰斗、角峰、冰碛物等古冰川遗迹比比皆是,表明曾有第四纪冰川发育。

### 3 地貌过程的垂直地带性

川西北高原的地貌垂直地带性表明,不同垂直气候带存在不同的主导地貌过程。冰川、冰缘和流水地貌的主导地貌过程,分别是冰川侵蚀,冻融侵蚀和流水侵蚀。冰缘地貌是川西北高原的最主要的地貌类型,显然冻融侵蚀是高原地区最重要的地貌过程。高原丘坡土层的典型结构如下:0~15cm 表层为灰黑色生草层,15~40cm 为黄棕色角砾土,角砾土层以下为寒冻风化角砾层和破碎岩石带。多年冻土层深度 0.4~1.5m 不等。冻融土流是高原丘坡最重要的融冻侵蚀方式,也是最重要的斜坡变形方式。丘坡多年冻土层以上的土层,随着季节的变化,处于或融或冻的状态。近地面的土层夏季融化,呈土流(earth flow)顺坡向下运移,堆积于坡麓,并进入谷地。丘坡冻融土流的土体变形是滑动、流动和蠕动的复合运动的结果。丘坡土流地面的流线状和波状构造是土流流动运动的表象;从开挖的公路剖面,常可见灰黑色生草层和下伏角砾土层之间的滑动;角砾土层和砂板岩破碎带中板片状角砾的定向排列,显然是土流蠕动的结果。丘坡土流的运动虽以季节性冻土层的流动和滑动为主,但永冻土层也有缓慢的蠕动。丘坡上部土流一般较薄,厚度多不足 1m;顺坡向下逐渐变厚,坡麓土流厚度可达 10 余 m。融冻土流广泛分布于高原面上的所有丘坡,每年将丘坡上的草甸土和下伏的角砾土层缓慢地侵蚀输送到坡麓和谷地。被土流输送到谷地的泥沙,以板片状砂板岩角砾为主,粒度以长、宽各 20~30cm,厚 5cm 左右的居多。高原面上的河流为鲜水河、大渡河的上游支流,流量小,搬运能力差,难以长距离搬运砂板岩粗角砾,土流搬运的角砾大量停积于谷地内。长期的地质历史过程中,丘坡岩土寒冻风化物质被融冻土流不断地缓慢输送进入谷地,因此谷地内发育有巨厚的以板片状砂板岩角砾为主的所谓“冰水”沉积,并形成宽阔平坦的河谷地貌。

冰缘地貌带的花岗岩和石灰岩等结晶岩组成的坡地,地表多为寒冻风化角砾覆盖,角砾之间缝隙中有草甸土发育,并生长有灌丛植物。坡地地表角砾土在重力和冻融的反复相互作用下,土层剖面中的角砾上移,细粒土相对下移,因此地表寒冻风化角砾之下往往有冻土分布。角砾土中的角砾在垂直方向上移的同时,也不断顺坡向下移动,形成“石河”,“石海”。此类坡地坡度陡缓不一,陡的大于 35 度,缓的小于 10 度。冰缘地貌带中,结晶岩坡地和砂板岩坡地的地貌过程同为冻融侵蚀,但前者地表风化碎屑物中细粒物质含量低,形成“石河”,“石海”等冻融石流;后者细粒物质含量高,形成冻融土流。

冰缘地貌带的上、下分别为冰川地貌带和流水地貌带,相应的主导地貌过程分别为冰川侵蚀和流水侵蚀,有关文献对川西横断山区的这两种过程均有较详细的报道,这里不再赘述。以下主要探讨川西北高原地貌的演化过程。在此之前,先简要分析川西北高原冰川地貌、冰缘地貌和岩层分布的关系。川西北地区,发育冰川地貌的高山山地,出露岩层均为花岗岩和石灰岩等结晶岩,前者如海拔 5369m 的年宝玉则雪山,后者如海拔 5588m 的雪宝顶;发育冰缘地貌的丘状起伏的高原面,出露岩层大多为由浅变质的砂板岩。显然,岩石性质对高原寒冻地貌的形成演化有重要的影响。结晶岩岩石强度高,抗寒冻风化能力强;矿物颗粒粗大,寒冻风化产物基本不含土状物质,透水性好。砂板岩构造破碎较强烈,岩石强度较低,抗寒冻风化能力差;风化岩土细粒物质含量较高,透水性较差。冰缘

地貌带中, 砂板岩坡地风化岩土含土较多, 易富水, 强度低, 冻融土流是斜坡变形的最主要方式, 坡地坡度多小于 20 度; 花岗岩和石灰岩等结晶岩坡地, 风化岩土含土量低, 透水性好, 冻融石流是斜坡变形的最主要方式, 坡地坡度取决于下部冻土层的发育程度和强度, 陡缓不一, 可大于 35 度。

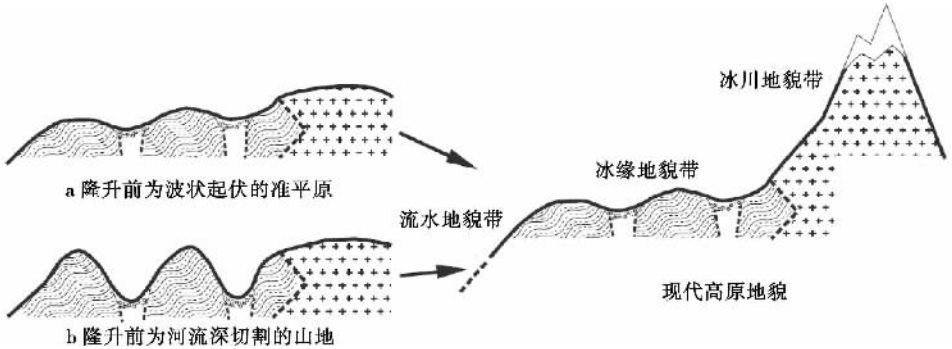


图 3 川西北高原地貌演化示意图

Fig. 3 Geomorphologic evolution of the Northwest Sichuan Plateau

尽管对高原隆升的起始时间认识不一, 但各家均用大面积的面状隆升解释川西北高原的形成, 一般认为隆升前川西北高原已为丘状起伏的准平原<sup>[3,4]</sup>。高原面与其上高山山地之间的巨大的高程差异是不均匀构造抬升的结果, 高山山地抬升量大, 高原面抬升量小; 没有认识到结晶岩和砂板岩的抗寒冻风化能力和斜坡寒冻变形过程的差异, 对高原面与高山山地地貌形成演化的影响。笔者赞同川西北高原的形成是大面积隆升的结果, 但认为川西北高原隆升前可能是丘状起伏的准平原, 也可能是河流深切的山地(图 3)。河流深切的山地隆升到冰缘地貌带高度后, 寒冻风化强烈, 主导地貌过程由流水侵蚀转变为冻融侵蚀, 冻融土(石)流等寒冻斜坡变形方式遍及所有坡地, 冻融土(石)流长期缓慢地将坡地风化岩土侵蚀输送到坡麓和谷地。由于降水形式(以雪为主)和下垫面条件的变化, 河流洪峰流量相应减小, 输沙能力随之降低, 流水作用显著减弱, 冻融土(石)流搬运进入主河的泥沙颗粒粗大, 以角砾为主, 难以长距离搬运。原先的深切谷地逐渐被大量以角砾为主的粗颗粒泥沙所充填, 成为广阔平坦的河谷平原、盆地; 原先的陡峻山地也被冻融侵蚀夷平为丘陵; 形成现今平缓丘陵和浅切河谷相间的丘状高原, 以及其间耸立的极高山冰川。这说明岩石性质对高原寒冻地貌的形成演化有重要的影响。

川西北高原广泛分布的砂板岩, 抗寒冻风化能力差, 物理风化物含土较多, 冻融土流是斜坡变形的最主要方式, 土流坡地坡度缓, 多小于 20 度。在冰缘地貌带的高度内, 砂板岩山地遭受了强烈的冻融侵蚀, 隆升过程中的山地高度一般不可能超过冰缘地貌带的上限。花岗岩和石灰岩等结晶岩, 抗寒冻风化能力强, 透水性好, 冻融岩屑流是斜坡变形的最主要方式之一, 寒冻风化碎屑组成的坡地往往较陡, 坡度可大于 35 度。结晶岩山地隆升过程中, 隆升往往可以战胜剥夷, 山地高度可超过冰缘地貌带上限, 发育高亢的冰川。

不管川西北高原隆升前是丘状起伏准平原还是深切的山地, 如果结晶岩冰川山地和砂板岩高原面隆升前的高程和构造抬升幅度一致, 则可从现今两者高程的差别分析两类岩石山地隆升期间的侵蚀厚度差异。年宝玉则雪山和雪宝顶的峰顶高度平均值, 海拔 5479m; 高原东部冰缘地貌带上限, 海拔 4200m; 两者相差 1279m, 这也就是两地的差异侵蚀的厚度。以上新世 500 万年以来的隆升期计, 因岩性不同, 年均差异侵蚀速率为

0.26mm, 从现代的侵蚀过程来看, 这种差异是可能的。

## 4 山地灾害对工程的影响

南水北调西线一期工程的五个枢纽工程的坝址高程 3410~3604m, 坝顶高程 3523~3709m。根据地貌带的海拔高度, 大坝和明渠, 位于流水地貌带和流水地貌带的交错地带; 库区主要在流水地貌带的范围内。工程沿线的主要山地灾害是斜坡上发生的滑坡、崩塌、冻融土流和沟谷内发生的泥石流。以下主要从地貌带的角度, 阐明斜坡变形和沟谷泥石流对大坝、水库、明渠和公路等主要工程和当地环境的影响。大坝位于流水地貌带和冰缘地貌带的交错地带, 每个大坝有 2~3 个预选坝址。实地考察表明, 下坝址多已进入流水地貌带, 河谷深切, 河床深窄, 基岩出露, 两岸谷坡陡峻, 坡度多大于 35 度; 有些枢纽的上坝址位于冰缘地貌带, 河谷宽阔, 河床宽浅, 砂砾堆积深厚, 两岸丘坡较缓, 坡度多在 20 度左右。坝址一带的河谷两岸谷坡, 冻融土流堆积发育, 也有古滑坡分布, 现代滑坡多为冻融土流堆积体滑坡, 有少量破碎基岩滑坡, 下坝址一带破碎基岩滑坡可能偏多。由于坝址一带岭谷高差不大, 多在 500~600m 左右, 滑坡规模多为中小型。鉴于冰缘地貌带河谷内松散堆积物厚度较大, 和流水地貌带河谷两岸的坡地经过流水侵蚀的“洗礼”, 一些谷坡基岩裸露, 稳定性也较好, 建议坝址尽量下移, 选择在流水地貌带的河谷内。库周山地中上部主要分布于冰缘地貌带内, 除一些海拔较低的阳坡坡地外, 几乎所有的坡地均有冻融土流发育, 河流凹岸常见中小型滑坡、崩塌。由于岭谷高差不大, 库区河流两岸谷坡大型滑坡、崩塌鲜见。冻融土流是未来水库泥沙的主要来源, 侵蚀速率和泥沙输移比情况不明。以砂板岩容重  $2.5\text{t}/\text{m}^3$  计, 结晶岩冰川山地和砂板岩冰缘高原面的自然侵蚀速率差异值为  $700\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ , 现代侵蚀速率可能大于此值。以上的粗略分析表明, 库区坡地的冻融侵蚀产沙量不容忽视, 对水库淤积的影响应引起重视。古今冰川山地距水库较远, 侵蚀产沙对水库淤积影响不大。工程沿线的大部分支沟均曾有泥石流发生, 冻融土流堆积是泥石流固体物质的最主要来源, 另中小型破碎基岩和堆积层滑坡、崩塌也是部分泥石流沟泥石流固体物质的重要来源。由于主河河谷与两岸山地岭谷高差不大, 泥石流支沟比降小, 流域内冻融土流、滑坡、崩塌规模多为中小型, 冰缘地貌带内的泥石流沟是数量多, 规模小。但冰缘地貌带和流水地貌带的交错部位, 如下坝址一带, 谷坡陡峻, 滑坡、崩塌规模较大, 部分沟谷可能有大型泥石流发生。坝址一带施工场地的布设, 特别要重视泥石流的危害。另阿柯河引水枢纽工程克柯坝与阿坝县县城之间的主河两岸, 泥石流支沟众多, 每年输送大量泥沙进入主河, 克柯坝上游引水后, 主河洪峰流量和输沙能力降低, 会引起主河上河床抬高, 危及县城安全。上述的冻融土流、滑坡、崩塌和泥石流等山地灾害对公路和其他工程附属设施的危害, 也应引起重视。受全球变化的影响, 高原地区气候变暖的趋势已很明显, 大面积水面的出现也可能引起当地气候的变化。工程沿线区地处冰缘地貌带和流水地貌带的交错部位, 地貌过程对气候变化的响应相当敏感, 建议加强这方面的研究工作。

## 5 结论

川西北高原的地貌垂直地带性明显: 流水地貌带  $< 3800\text{m}$ ; 冰缘地貌带  $3800 \sim 4200\text{m}$ ; 冰川地貌带  $> 4200\text{m}$ ; 相应的主导地貌过程分别是流水侵蚀、冻融侵蚀和冰川侵蚀。

川西北高原是大面积构造隆升背景下冻融侵蚀为主形成的夷平面, 隆升前的原始地貌可能是丘状起伏的准平原, 也可能是河流切割的山地。高原广泛分布的砂板岩, 抗寒冻风化能力差, 风化岩土含土较多, 冻融土流是斜坡变形的的主要方式, 土流坡地坡度缓, 多小于 20 度。砂板岩坡地冻融土流侵蚀强烈, 隆升过程中地面高度一般不可能超过冰缘地貌带的上限。花岗岩和石灰岩等结晶岩抗寒冻风化能力强, 透水性好, 冻融岩屑流是斜坡变形的的主要方式, 坡地往往较陡。结晶岩山地在隆升与夷平的过程中, 隆升可能超过夷平, 隆升过程中的山地高度可以超过冰缘地貌带的上限, 形成发育有冰川的高山山地。

从川西北高原的地貌垂直地带性的初步认识, 笔者认为有必要对青藏高原面的形成和高原隆升的一些重大科学问题, 如寒冻侵蚀在高原地貌形成中的作用、地面隆升幅度与地壳构造上升幅度、高原面高度的区域差异和大冰盖等问题重新认识; 对传统的夷平面理论要重新思考, 除非地带性的流水夷平面外, 可能还存在地带性的寒冻夷平面和干旱夷平面。

南水北调西线一期工程主要位于流水地貌带与冰缘地貌带的交界地带, 工程沿线的主要山地灾害是斜坡上发生的滑坡、崩塌、冻融土流和沟谷内发生的泥石流。由于岭谷高差不大, 斜坡山地灾害规模多为中小型。工程沿线地区泥石流沟数量多, 规模小; 但流水地貌带河谷的两岸支沟, 如下坝址附近的部分沟谷可能有大型泥石流发生。库区冻融土流的侵蚀产沙量不容忽视, 对水库淤积的影响应引起重视。阿柯河引水后洪峰流量减少, 输沙能力降低, 有可能抬高河床, 危及阿坝县县城安全。全球变化和工程修建后的大面积水面的出现, 均可能对当地的气候产生一定的影响。工程沿线区地处冰缘地貌带和流水地貌带的交错部位, 地貌过程对气候变化的响应相当敏感, 建议加强这方面的研究工作。

#### 参考文献:

- [1] 崔荃. 南水北调西线第一期工程规划. 人民黄河, 2001, 23(10):23~24.
- [2] 李国英. 对南水北调西线工程的认识与评价. 中国水利, 2002, (3):27~29.
- [3] 柴宗新. 试论川西高原的形成. 山地研究, 1983, 1(4): 22~30.
- [4] 穆桂春. 若尔盖高原的自然概况与地貌发育. 四川地理, 1979, (1):8~13.
- [5] 孙鸿烈. 青藏高原的形成演化. 上海:上海科学技术出版社. 1994. 1~369.
- [6] 施雅风, 李吉均. 80 年代以来中国冰川学和第四纪冰川研究的新进展. 冰川冻土, 1994, 16(1): 1~14.
- [7] 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. 第四纪研究, 2001, 5(21):2~12.
- [8] 崔之久, 高全洲, 刘耕年, 等. 青藏高原夷平面与岩溶时代及其高度. 科学通报, 1996, 41(15):1402~1406.
- [9] 崔之久, 高全洲, 刘耕年, 等. 夷平面、古岩溶与青藏高原隆升. 中国科学. 1996, 4(26):378~387.
- [10] 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.
- [11] 李炳元, 潘保田. 青藏高原古地理环境研究. 地理研究, 2002, 21(1):61~70.
- [12] Ollier C, Pain C. The Origin of Mountains. London: Routledge. 2000. 1~315.
- [13] Michael A S. Geomorphology and Global Tectonics. New York: John Wiley & Sons. , 2000. 1~357.
- [14] Cervenny P F, Naeser N D, Zeiler P K, *et al.* History of uplift and relief of the Himalayas during the past 18 million years. In: Kleinspehn K L, Paulo C. (eds.). Evidence from Fission-track Ages of Detrital Zircons from Sandstones of the Siwalik Group. New York: New Perspectives in Basin Analysis. Springer-Verlag. 1998. 43~61.
- [15] Copeland P, Hanson T M. Episodic rapid uplift of the Himalayas revealed by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analysis of detrital K-feldspar and muscovite, Bengal Fan. Geology, 1990, 18:354~357.
- [16] Udin A, Lundberg N. Cenozoic history of the Himalaya-Bengal system; sand composition in the Bengal basin, Bangladesh. Bull. Geol. Soc. Am., 1998, 110:497~511.

- [17] 郑远昌,高生淮. 雪宝顶自然垂直地带特征. 高生淮,郑远昌 主编. 横断山研究文集. 成都:四川科学技术出版社, 1989. 178~182.
- [18] 刘淑珍,王明龙. 横断山区第四纪冰川地貌. 高生淮,郑远昌 主编. 横断山研究文集. 成都:四川科学技术出版社, 1989. 13~22.
- [19] 崔之久. 四川攀西螺髻山第四纪冰川作用遗迹与冰期系列. 冰川冻土, 1986, 8(2):15~26.
- [20] 徐道明,沈永平. 青藏高原的泛冰盖遗迹与冰期. 冰川冻土, 1995, 17(3):213~229.
- [21] 边纯玉,郭鹏飞. 中国青藏高原黄河源区冰缘地貌特征. 冰川冻土, 1990, 12 (2):147~153.
- [22] 唐邦兴,刘世建,柳素清,等. 四川西部杂谷脑地区晚更新世“冰碛物”成因之探讨. 冰川冻土, 1996, 18(S1):234~242.

## Vertical geomorphologic zonation on the Northwest Sichuan Plateau and the effects of mountain hazards on the West Route of the South-to-North Water Diversion Project

ZHANG Xin-bao, WU Ji-shan, WANG Yang-chun

(Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Vertical geomorphologic zoning on the Northwest Sichuan Plateau is obvious and elevations for different geomorphologic zones are: fluvial zone  $< 3800\text{m}$ ; glacial margin zone  $3800 - 4200\text{m}$ ; and glacial zone  $> 4200\text{m}$ . Their correspondent principal geomorphologic processes are water erosion, thawing erosion and glacial erosion. The plateau terrain was formed as a result of the thawing erosion under the conditions of vast expanse tectonic uplift. Crystalline rocks of granite and limestone have higher strength against thawing erosion than Triassic epimetasediment rocks of sandstone and slate. Therefore, crystalline rocks are able to form high glacial mountains while Triassic epimetasediment rocks are not. However, Triassic epimetasediment rocks are prone to form hilly plateau terrain. The 1<sup>st</sup> stage subproject of the West Route of the South-to-North Water Diversion Project is basically located along the boundary between the fluvial zone and the periglacial zone, landslides, rock-falls and thawing solifluctions are major slope failure hazards and most of those hazards are of small-medium scales. There are a number of debris flow gullies where small-medium scale debris flows occur frequently in the project area, however, large scale debris flows may occur in the gullies of the fluvial zone. Thawing solifluctions are the main river sediment sources in the area and attentions should be paid to the effects of their sediment production on silting of the planned reservoirs. Geomorphologic processes are very sensitive to climate changes in the boundary area between the fluvial zone and the periglacial zone.

**Key words:** South-to-North Water Diversion Project; 1<sup>st</sup> stage subproject of the West Route Project; Northwest Sichuan Plateau; vertical geomorphologic zonation; mountain hazards