

文章编号: 1008 - 2786 - (2006)5 - 607 - 05

# 川西北高原的地貌垂直地带性与寒冻夷平面

张信宝, 吴积善, 汪阳春, 贺秀斌, 齐永青

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 川西北高原地貌垂直地带性明显: 流水地貌带, < 3 800 m; 冰缘地貌带, 3 800 ~ 4 200 m; 冰川地貌带, > 4 200 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。本文提出了高原面形成的寒冻夷平机制, 并认为川西北高原是大面积构造隆升背景下形成的寒冻夷平地貌。花岗岩和石灰岩等结晶岩抗寒冻风化能力强, 形成了冰川发育的高山; 三叠系砂板岩, 抗寒冻风化能力差, 形成了融冻土流发育的丘状起伏的高原面。此外, 还延伸联想到青藏高原夷平面和高原隆升的一些科学问题, 如冻融侵蚀在高原地貌形成和演化中的作用, 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问题等。

**关键词:** 川西北高原; 地貌垂直地带性; 融冻土流; 寒冻夷平; 青藏高原

**中图分类号:** P931

**文献标识码:** A

川西北高原位于青藏高原的东北缘, 为丘状高原, 地势起伏和缓, 高原面海拔 4 000 m 左右。高原面上, 山势低矮浑圆, 谷地宽阔平坦。年宝玉则和雪宝顶是高原地区发育有现代冰川的两座山地, 最高峰海拔分别为 5 588 m, 和 5 639 m。柴宗新、穆桂春等人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 4 000 ~ 5 000 m 的高度, 形成了川西高原<sup>[1,2]</sup>。2003 ~ 2004 年, 我们对穿越川西北高原的南水北调西线一期工程沿线地区的滑坡、泥石流等山地灾害进行了考察。考察过程中, 我们注意到川西北高原存在明显的地貌垂直地带性, 并认识山原面可能是融冻土流夷平作用的产物。本文主要介绍川西北高原的地貌垂直地带性和探讨山原面的形成机制, 最后延伸联想青藏高原的夷平面和高原隆升的一些问题。

## 1 地貌垂直地带性

川西北高原东侧岷山山脉的雪宝顶位于阿坝藏

族羌族自治州松潘县东部, 最高峰海拔 5 588 m, 山体组成为二叠系灰岩。郑远昌、高生淮对其自然垂直带谱进行了较深入的研究<sup>[3]</sup>。雪宝顶地区的气候基带属山地暖温带, 年均气温 5.7 °C, 1 月均温 - 4.3 °C, 7 月均温 14.5 °C; ≥ 10 °C 的年积温 1 321.9 °C, 全年日照时数 1 827.5 h。年降水量 727.7 mm, 5 ~ 9 月雨季占 75%。从河谷到山顶, 植被、土壤的垂直分异明显, 可分为 5 个自然垂直带: (1) 山地暖温带阔叶混交林带。海拔 3 000 m 以下的河谷地带, 自然植被为铁杉、冷杉和槭树、桦树等组成的阔叶混交林, 土壤为山地棕壤。(2) 亚高山寒温带暗针叶林带。海拔 3 000 ~ 3 800 m, 自然植被为以云杉、冷杉为主的暗针叶林, 土壤为山地暗棕壤。(3) 高山亚寒带灌丛草甸带。海拔 3 800 ~ 4 200 m, 自然植被为高山灌丛草甸。灌丛以杨柳科、杜鹃花科和蔷薇科绣线菊属植物为主; 草本植物以蓼科和禾本科为主。土壤为高山草甸土。(4) 高山寒带疏草带。海拔 4 200 ~ 5 200 m, 该带植物稀少, 为由红景天、蚤缀等组成的流石滩稀疏植被。流石滩地面岩石碎屑裸露, 土壤未发育。(4) 高山冰雪带。海拔 5 200 m 雪线以上, 发育有现代冰川。从

收稿日期 (Received date): 2006 - 05 - 10。

**基金项目 (Foundation item):** 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX3 - SW - 323)、国家自然科学基金委员会 (KZCX2 - SW - 118, 90502002) 和科技部 (2003CB415202) 资助 [Supported by Knowledge Innovation Project of CAS (KZCX3 - SW - 323), NNSF (40271015, 90502002) and MST (2003CB415202) ]

**作者简介 (Biography):** 张信宝 (1946 - ), 男, 汉, 江苏镇江人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: zxbao@imde.ac.cn [Zhang Xinbao (1946 - ), Male, Professor & Doctor adviser; Main research field: soil erosion and conservation ]

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3 800 m以下的非冻土带,(2)海拔3 800~4 200 m的多年冻土带,(3)海拔4 200 m以上的新老冰川带。其中海拔5 200 m的雪线以上,现代冰川发育,冰川舌向下深延到4 600 m;海拔4 200~5 200 m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<sup>[4]</sup>。

相应于植被、土壤和冰川冻土的垂直地带性<sup>[3]</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<3 800 m;冰缘地貌带,海拔3 800~4 200 m;冰川地貌带,海拔>4 200 m(图1)。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带幅略有差异。高原面上为典型的冰缘地貌,地面丘状起伏,坡度较缓,多>20°。谷坡发育有高山草甸土,土层薄,40 cm左右。由于气候寒冷,有机质分解和淋溶不显著,表层0~15 cm为富含粗腐殖质的根系盘结的灰黑色生草层;深度15 cm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20~30 cm,厚5 cm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0.4~1.5 m深度以上为季节性冻土,冬季冻结,夏季融化。高原面上水系为雅砻江、大渡河、岷江的上游,河谷下切较浅,岭谷高差多<500 m,谷底较宽阔平坦,河谷最宽处达6 000~8 000 m,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>[5-8]</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。

冰缘地貌带以下为流水地貌带,河谷深切,谷底狭窄,谷坡陡峻,多>35°。河谷内基座阶地发育,随着河流的延伸,砾石逐渐磨圆。冰缘地貌带以上为冰川地貌带。年宝玉则和雪宝顶是高原地区发育有现代冰川的两座山地,最高峰海拔分别为5 588 m,和5 639 m。海拔5 200 m的雪线以上,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。古冰斗和古冰川谷的基岩陡峭,现物理寒冻风化强烈,岩屑锥和岩石河发育。

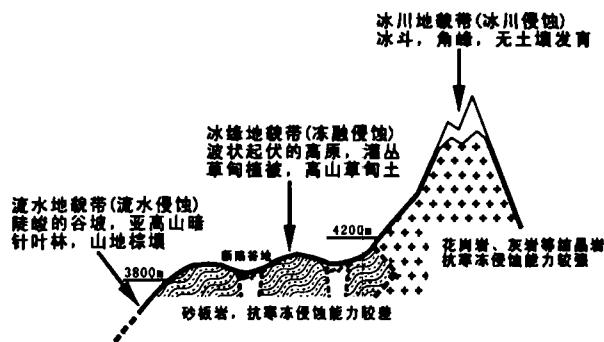


图1 川西北高原地貌垂直分带示意图

Fig. 1 Vertical geomorphologic zonation in the Northwest Sichuan Plateau

## 2 山原面的寒冻夷平机制

前人一般认为,包括川西北高原在内的青藏高原隆升前是准平原<sup>[9-15]</sup>,忽略了高原坡地最重要的斜坡变形方式——冻融土流,在高原面形成中的作用。高原坡地土层随着季节的变化,处于或冻或融的状态。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。坡地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。坡地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。坡地上部土流一般较薄,厚度多不足1 m;顺坡向下逐渐变厚,坡麓土流厚度可达10余m。冻融土流广泛分布于高原面上的所有坡地,每年将坡地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20~30 cm,厚5 cm左右的居多。高原面上的河流为雅砻江、大渡河、岷江的上游支流,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,坡地岩土寒冻风化物质被冻融土流持续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。大起伏地形的坡地坡度大,冻融土流流速快,侵蚀速率高;小起伏地形的坡地坡度小,冻融土流流速慢,侵蚀速率低。地面隆升到冰缘地貌带后,冻融土流成为主要斜坡变形方式。大起伏地形冻融土流侵蚀速率高,夷平为小起伏地形后,侵蚀速率随之降低(图2)。

冰缘地貌带的丘状高原夷平面,可能是地面隆升到冰缘带高度后,构造隆升和冻融土流地面剥夷

竞争平衡的产物。在长期稳定的气候条件下,在一定的构造隆升速率幅度内,斜坡变形以冻融土流为主的坡地形态处于稳定态(steady state),即构造隆升速率和地面剥夷速率相等。冻融土流的剥夷速率极限值,是冻融夷平面形成的最大容许构造隆升速率。砂板岩风化碎屑颗粒细,含水量较高,岩土强度低,冻融土流的地面剥夷速率极限值一般远高于高原构造隆升速率,因此高原面的高程一般不超过冰缘地貌带的上限。花岗岩和石灰岩等结晶岩,风化碎屑颗粒粗,含水量低,岩土强度高,结晶岩冻融土流的地面剥夷速率极限值多低于高原构造隆升速率,在隆升与夷平的竞争中,隆升往往战胜夷平,高程超过冰缘地貌带的上限,形成耸立的冰川雪山。川西北高原隆升前为准平原的推断是不可靠的,深切的山地,经过长期的隆升—剥夷作用,也可以形成丘状起伏的高原<sup>[20]</sup>。高原面与冰川山地的巨大高程差异,未必是构造抬升幅度差异所致,也可能是岩层差异侵蚀的结果(图3)。

无论川西北高原隆升前是丘状起伏准平原还是深切的山地,假定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,从现今两者高程的差别,可以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5 614 m;高原东部冰缘地貌带上限,海拔4 200 m;两者相差1 414 m。假定隆升前的高程和构造抬升幅度一致,两地的差异侵蚀厚度为1 414 m。以上新世500万年以来的隆升期计,年均差异侵蚀速率0.28 mm。

### 3 延伸联想

川西北高原寒冻夷平面认识的突破,使我们不得不反思青藏高原夷平面形成和高原隆升的一些科学问题<sup>[16-20]</sup>。

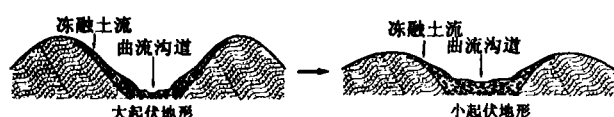


图2 寒冻夷平面形成的冻融土流机制  
Fig. 2 Mechanism for formation of freezing planation by freeze-thaw earth flows

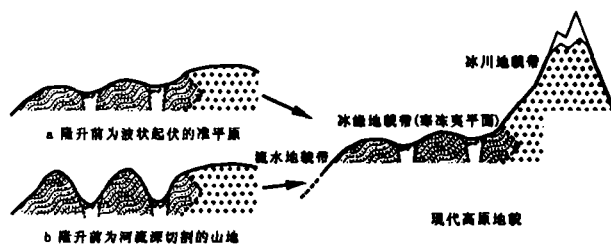


图3 川西北高原地貌演化示意图

Fig. 3 Geomorphologic evolution of the Northwest Sichuan Plateau

#### 3.1 冻融侵蚀在高原地貌形成中的作用

同川西北高原,青藏高原高原面地区出露岩层主要是以砂板岩为主的中、古生代的浅变质岩系;高原边缘地带和高原面上有冰川发育的山地,出露岩层均为花岗岩和石灰岩等结晶岩。毋庸置疑,青藏高原是大面积构造隆升的产物。高原面有可能是地面隆升到冰缘地貌高度后,冻融侵蚀形成的夷平地,隆升前的原始地貌可能是丘状起伏的准平原,也可能是河流深切的山地。冰川分布山地的高度高于高原面,可能是由于风化岩土含土较少的花岗岩和石灰岩等结晶岩,抗寒冻风化能力强于砂板岩的缘故。

#### 3.2 地面隆升幅度与地壳构造上升幅度

古今地面高度的对比,是求算高原隆升幅度的传统方法。如喜马拉雅山北坡现代地面高度为 $5\,000 \pm \text{m}$ ,上新世准平原地面高度 $1\,000 \pm \text{m}$ ,第四纪以来的地面隆升幅度 $4\,000 \text{ m}^{[9]}$ 。此种算法求得的隆升幅度是地壳构造上升量和地表剥夷量的差值,不是构造上升幅度。喜马拉雅山北坡,如第四纪以来剥夷厚度为 $5\,000 \text{ m}$ ,第四纪以来的构造上升幅度不是 $4\,000 \text{ m}$ ,而是 $9\,000 \text{ m}$ 。现有文献中的青藏高原隆升幅度,一般没有明确其内涵,往往被错以为等同于构造上升幅度。

#### 3.3 高原面海拔的区域差异

青藏高原高原面海拔存在明显的区域差异,总的呈西高东低的趋势,如西藏的羌塘高原海拔 $4\,500 \sim 5\,000 \text{ m}$ ,四川的阿坝高原仅 $3\,800 \sim 4\,200 \text{ m}$ 。前人多用构造上升幅度的不同,解释高原面高度的区域差异。如高原夷平面是冻融剥夷的产物,高原面的地面高度应对应于冰缘地貌带的高度,也就是说对应于山地垂直气候带中的冰缘气候带的高度。由于基带气候的差异等原因,不同区域的冰缘气候带的高度不一。藏西北羌塘高原气候干旱,冰缘气候

带的高度较高,因此高原面的海拔也相应较高;四川阿坝、若尔盖一带气候湿润,高原面的海拔相应较低。

### 3.4 大冰盖问题

青藏高原的高原面,出露岩层主要是以砂板岩为主的中、古生代的浅变质岩系,抗寒冻风化能力差,风化岩土含土较多,高原面上升到冰缘地貌带高度后,坡地冻融土流剥夷侵蚀强烈,在隆升与冻融剥夷的斗争中,隆升不可能战胜夷平,高原面的地面高度从未超过冰缘地貌带的上限。这就意味着,青藏高原高原面地区从未发育过大冰盖;花岗岩和石灰岩等结晶岩山地区,岩石抗寒冻风化能力强,隆升可能战胜夷平,形成发育有冰川的极高山。冰期时气候的变冷变干,会引起冰缘气候带高度的移动,但不会导致冰缘气候带的消失。因此笔者也不赞成冰期时气候干旱,是造成青藏高原未发育过大冰盖的原因。冰盖的发育与否,主要取决于积雪的长期累积量,只要降雪量大于消融量,又有足够长的时间,干旱的气候条件下,也可以发育冰盖。

### 参考文献(References)

- [1] Chai Zongxin. A discussion on the formation of the plateau in west Sichuan [J]. *Mountain Research*, 1983, 1(4): 22 ~ 30 [柴宗新. 试论川西高原的形成[J]. 山地研究(现山地学报), 1983, 1(4): 22 ~ 30]
- [2] Mu Guichun. Physical conditions and geomorphology development of Ruogai Plateau [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 1982, 4: 42 ~ 46 [穆桂春. 若尔盖高原的自然概况与地貌发育[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 1982, 4: 42 ~ 46]
- [3] Zheng Yuanming, Gao Shenghuai. Vertical zonal characters of Xuebaoding [A]. In: Gao Shenghuai, Zheng Yuanchang. The Collected Papers of Researches for the Hengduan Mountain [C]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1989. 178 ~ 182 [郑远昌, 高生淮. 雪宝顶自然垂直地带特征[A]. 见: 高生淮, 郑远昌. 横断山研究文集[C]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989. 178 ~ 182]
- [4] Liu Shuzhen, Wang Minglong. Quaternary glacial geomorphology of Hengduan Mountain [A]. In: Gao Shenghuai, Zheng Yuanchang. The Collected Papers of Researches for the Hengduan Mountain [C]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1989. 13 ~ 22 [刘淑珍, 王明龙. 横断山区第四纪冰川地貌[A]. 见: 高生淮, 郑远昌. 横断山研究文集[C]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989. 13 ~ 22]
- [5] Cui Zhijiu. Paleoglacial traces and series of Mutiglaciation in the Luojieshan Mountain [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1986, 8(2): 15 ~ 26 [崔之久. 四川攀西螺髻山第四纪冰川作用与冰期系列[J]. 冰川冻土, 1986, 8(2): 15 ~ 26]
- [6] Xu Daoming, Sheng Yongping. On ancient ice-sheet and ice age in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(3): 213 ~ 229 [徐道明, 沈永平. 青藏高原的泛冰盖遗迹与冰期[J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 213 ~ 229]
- [7] Bian Chunyu, Guo Pengfei. Geomorphic characteristics of periglacier in the source area of Yellow River in Qinghai-Xizang Plateau, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1990, 12(2): 147 ~ 153 [边纯玉, 郭鹏飞. 中国青藏高原黄河源区冰缘地貌特征[J]. 冰川冻土, 1990, 12(2): 147 ~ 153]
- [8] Tang Bangxing, Liu Shijian, Liu Suqing, et al. Exploration on formation of moraines since late pleistocene in Zagunao of western Sichuan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl.): 234 ~ 242. [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[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊): 234 ~ 242]
- [9] Sun Honglie. Formation and evolution of Qinghai-Xizang Plateau [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1994. 79 ~ 94 [孙鸿烈. 青藏高原的形成演化[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994. 79 ~ 94]
- [10] Shi Yafeng, Li Jijun. The application of MMFA model on date prediction of River Freeze-up [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(1): 1 ~ 14 [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[J]. 冰川冻土, 1994, 16(1): 1 ~ 14]
- [11] Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian, et al. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 2 ~ 12 [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[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 2 ~ 12]
- [12] Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian, et al. The initial evolution of planation surfaces and palaeokarst [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(11): 934 ~ 938 [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[J]. 科学通报, 1996, 41(15): 1402 ~ 1406]
- [13] Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian, et al. Planation surfaces, Palaeokarst and uplift of Xizang (Tibet) Plateau [J]. *Scientia Sinica (series D)*, 1996, 39(4): 391 ~ 400 [崔之久, 高全洲, 刘耕年, 等. 夷平面、古岩溶与青藏高原隆升[J]. 中国科学, 1996, 4(26): 378 ~ 387]
- [14] Pan Baotian, Gao Hongshan, Li Bingyuan, et al. Step-like landforms and uplift of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 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[J]. 第四纪研究, 2004, 24(1): 50 ~ 57]
- [15] Li Bingyuan, Pan Baotian. Progress in paleogeographic study of the Tibetan Plateau [J]. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 61 ~ 70 [李炳元, 潘保田. 青藏高原古地理环境研究[J]. 地理研究, 2002, 21(1): 61 ~ 70]
- [16] Cliff Ollier, Colin Pain. The Origin of Mountains [M]. Routledge. London, 2000. 315
- [17] Michael A. S. Geomorphology and Global Tectonics [M]. John Wiley & Sons, New York, 2000. 357
- [18] Cerveny, P. F., Naeser, N. D., Zeiler, P. K., et al. History of

- uplift and relief of the Himalaya during the past 18 million years. Evidence from fission-track ages of detrital zircons from sandstones of the Siwalik Group[A]. In: Kleinspehn, K. L. and Paulo, C. New Perspectives in Basin Analysis[C]. Springer-Verlag, New York, 1998. : 43 ~ 61
- [19] 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[J]. *Geology*, 1990, 18: 354 ~ 357
- [20] Udin, A. , Lundberg, N. Cenozoic history of the Himalaya-Bengal system: Sand Composition in the Bengal basin, Bangladesh [ J ]. *Bull. Geol. Soc. Am.* , 1998, 110: 497 ~ 511

## Vertical Geomorphologic Zonation in the Northwest Sichuan Plateau and Freezing Planation Surface

ZHANG Xinbao, WU Jishan, WANG Yangchun, HE Xiubing, QI Yongqing

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China*)

**Abstract:** Vertical geomorphologic zoning in the Northwest Sichuan Plateau is obvious and elevations for different geomorphologic zones are: fluvial zone, <3 800 m; glacial margin zone, 3 800 ~ 4 200 m; glacial zone, >4 200 m. A freezing planation mechanism is proposed to explain formation of the plateau surfaces and the Northwest Sichuan Plateau is freezing planation geomorphology, which is formed under tectonic uplift conditions in a large area. In the plateau, the high glacial mountains are usually underlain by crystalline rocks of granite and limestone while the hilly plateau surfaces are underlain by Triassic epimetasediment rocks of sandstone and slate, because crystalline rocks have higher strength against freezing weathering than epimetasediment rocks. In addition, a few of scientific questions on planation surfaces and uplifting of Tibet Plateau are also discussed in this paper, such as the function of freezing planation in the plateau formation and evolution, the magnitudes of plateau surface elevation increase and of tectonic uplifting in the plateau, regional differences of plateau surfaces, and the giant ice caps.

**Key words:** Northwest Sichuan Plateau; Vertical geomorphologic zoning; freeze-thaw earth flows; freezing planation; Tibet Plateau