

中国典型山地冰川平衡线的影响因素分析

张 威¹, 刘蓓蓓¹, 崔之久², 李洋洋¹, 刘 亮¹

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029;

2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要: 中国典型山地无现代冰川作用区冰川平衡线高度的确定对于过去环境变化研究具有重要的科学意义。选取青藏高原边缘17个山体的28个气象站气温与降水数据, 采用确定的最大降水带与经验曲线关系法(简称MPC, 下同)、确定的最大降水带与统计公式法(MPF)和实际气象站降水与经验公式法(WPF), 恢复了17个山体的现代理论冰川平衡线高度, 并对比了三种方法的适用性; 综合分析了三种方法的原理、参数选取、计算过程以及误差来源; 详细讨论了冰川平衡线处气温与降水关系式、气象站的海拔高度、气温垂直递减率、降水梯度对计算现代冰川平衡线的影响。提出了无现代冰川区的现代理论冰川平衡线计算的综合因子法(ZYZ)。

关键词: 平衡线; 青藏高原; 降水梯度; 气温; 冰川

DOI: 10.11821/dlxb201407008

冰川平衡线是冰川积累量和消融量的零平衡, 积累量主要由降水控制, 消融量主要由夏季气温控制。中国东部一些山地或海拔较低的丘陵地区是否曾经发育过冰川已争论了多年^[1], 争论双方均从不同角度提出各类证据, 其中关键的证据之一就是古冰川平衡线高度及其对应的冰期气候。在第四纪冰川研究过程中, 研究者利用地貌证据恢复过去地质时期的冰川平衡线高度^[2], 并与现代冰川平衡线进行对比^[3], 从而推断某一山地是否具备冰川发育的气候条件。由此可见, 现代和古冰川平衡线高度的确定是否合理至关重要。对于中国东部许多山地而言, 目前均无冰川发育, 其现代理论冰川平衡线是根据西部现代冰川区平衡线处的年降水量、夏季平均温度相关曲线与经验方程确定^[4-7], 而古冰川平衡线高度可以根据合适的方法来推算^[8-12]。对于古冰川平衡线高度的确定, 目前国内外学者倾向于多种方法的综合运用取平均值, 并开始关注新构造运动对冰川平衡线的影响^[12-15]。但是, 对于影响中国东部现代理论冰川平衡线计算的因素并没有人做过仔细讨论。本文以中国东部和青藏高原外围的17个典型山体为研究对象^[16-30], 采用这些山体周围28个气象站的气温与降水数据, 运用目前比较常用的计算现代理论平衡线的方法, 计算了17个山体的现代理论冰川平衡线高度, 用得到的计算结果诠释不同方法的具体含义、参数获取、计算过程和可能的误差来源, 并分析影响现代冰川平衡线计算的多种因素, 提出合理的计算方法。

1 现代冰川平衡线计算方法

对于中国无现代冰川区的典型山地, 想要恢复现代理论平衡线高度, 主要有如下3种方法:

收稿日期: 2014-01-16; 修订日期: 2014-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271093; 41230743; 40971010) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41271093; No.41230743; No.40971010]

作者简介: 张威 (1969-), 男, 吉林松原人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员 (S110008848M), 主要从事环境与灾害地貌研究。E-mail: zhangweilnu@163.com

通讯作者: 刘蓓蓓 (1989-), 女, 辽宁辽阳人, 硕士, 主要从事环境与灾害地貌研究。E-mail: bb_liu_lnnu@163.com

1.1 最大降水带与经验曲线关系法 (Maximum Precipitation Curve, 简称MPC法)

根据施雅风^[1]1989年提出的计算中国东部地区现代平衡线方法实例, 其计算过程如下:

$$P_2 = P_1 + (2000 - H_1) / M \tag{1}$$

式中, P_2 为现代平衡线处降水量, P_1 为气象站年平均降水量, H_1 为气象站海拔高度, M 为降水梯度。

确定现代平衡线处的气温(T_2)。 P_2 确定之后, 根据苏珍统计的中国西部现代冰川平衡线处年降水量和夏季6~8月平均气温的推算值绘制的曲线^[1], 查出对应 P_2 降水量的夏季平衡气温值(T_2)

$$P_2 \rightarrow T_2 \tag{2}$$

$$T_1 - T_2 = \Delta T \tag{3}$$

$$\Delta T / G = \Delta H \tag{4}$$

$$H = H_1 + \Delta H \tag{5}$$

式中, P_2 为现代平衡线处降水量, T_2 为现代平衡线处气温, T_1 为气象站6-8月平均气温, ΔT 为现代平衡线和气象站之间的气温差, G 为气温垂直递减率, ΔH 为现代平衡线和气象站之间的高差, H 为现代平衡线高度, H_1 气象站海拔高度。

1.1.1 确定现代平衡线处的降水 (P_2) 由于现代平衡线附近的降水很难确定, 施雅风^[1]采用Kerschner^[31]推算阿尔卑斯平衡线处降水量的方法, 并结合中国东部山地的降水资料, 以2000 m高度处降水量作为平衡线处的降水量 (P_2)。要想求出 P_2 , 则需要利用各个山地的山上或者山麓气象站海拔高度 H_1 和年平均降水量 (P_1) 以及降水梯度 (M)。这里面降水梯度的确定存在两种情况: 一是在同一山体附近若存在不同高度处的气象站时, 则可利用多个气象站降水数据求出山体的实际降水梯度; 二是若只有一个气象站, 则只能根据中国东部降水量与降水梯度的关系图^[1], 大致推算山体的降水梯度。

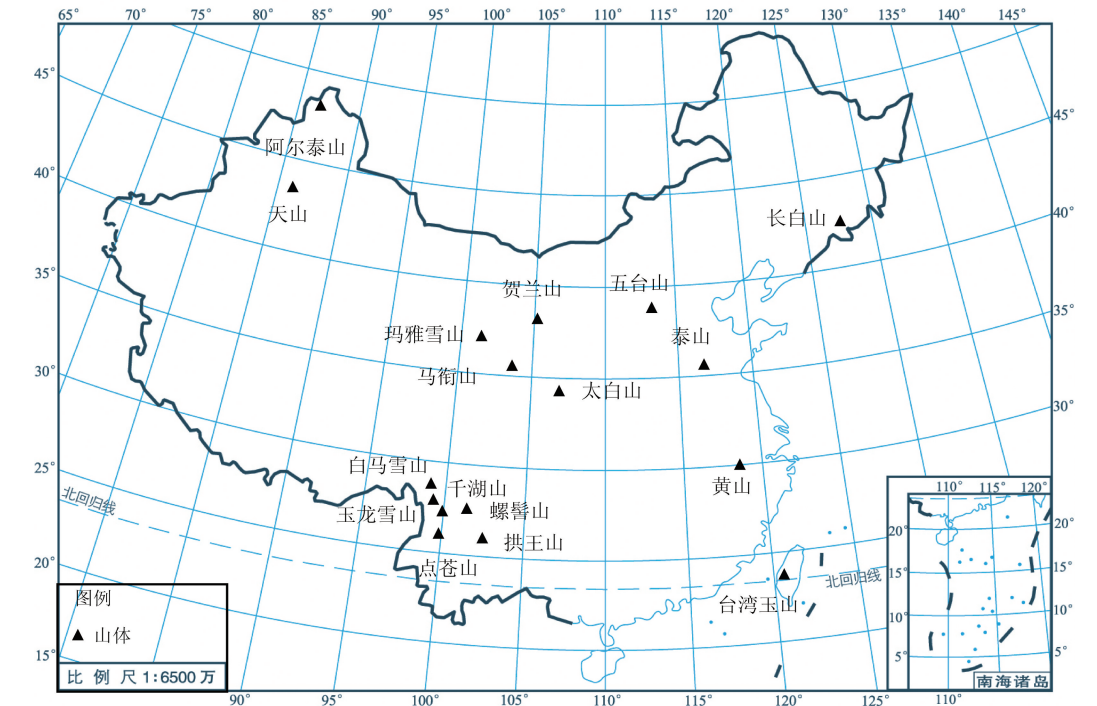


图1 山体分布位置图 (数据来自国家测绘地理信息局, 网址: <http://www.sbsm.gov.cn/article/zxbs/dtfw/>)
Fig. 1 Distribution of the mountains (<http://www.sbsm.gov.cn/article/zxbs/dtfw/>)

表 1 不同方法计算的现代理论平衡线处的高度、夏季气温和年降水量对比表
Tab. 1 The altitude, summer temperature and precipitation at ELAs using different methods

方法						MPC			MPF			WPF			气象资料来源
	地理坐标 (N,E)	气象站高度 (m)	气象站6-8月气温(°C)	气象站年降水量 (mm)	实际平衡线高度(m)	冰川平衡线高度(m)	气温 (°C)	降水 (mm)	冰川平衡线高度(m)	气温 (°C)	降水 (mm)	冰川平衡线高度(m)	气温 (°C)	降水 (mm)	
阿尔泰山	47°, 88°	1900	11.9	664	3320	3688	1.17	689	3750	0.8	689	3873	0.06	664	[35]
天山	43°, 86°	3539	4.3	454	4056	4239	0.1	454	4294	-0.23	454	4365	-0.66	454	[36]
长白山	42°, 128°	2624	6.9	1340		3290	2.9	1340	3364	2.46	1340	3407	2.2	1340	[1]
贺兰山	38°, 106°	2901	10.6	430.2		4654	0.08	430.2	4727	-0.36	430	4791	-0.74	430.2	[37]
玛雅雪山	37°, 102°	3045	10.3	355.4		4856	-0.57	355.4	4900	-0.83	355	4928	-1	355.4	[23]
泰山	117°, 36°	1534	16.8	1132		3867	2.8	1267	3949	2.31	1267	4072	1.57	1132	[1]
马衙山	36°, 103°	1800	19	494.8		4883	0.5	536.8	4935	0.19	537	5050	-0.5	494.8	[38]
太白山	34°, 107°	1543	19.3	752.6		4451	1.85	876	4526	1.4	876	4700	0.36	752.6	[39]
五台山	113°, 39°	2898	9.5	828.5		4198	1.7	828.5	4271	1.26	829	4380	0.61	828.5	[40]
黄山	118°, 30°	1840	16.6	2394		3906	4.2	2461	3946	3.96	2461	3756	5.1	2394	[1]
白马雪山	28°, 99°	4292	5.1	807.1	4800	4867	1.65	807.1	4942	1.2	807	5054	0.53	807.1	[34]
千湖山	27°, 99°	3276	12.9	849.8		5134	1.75	849.8	5206	1.32	850	5312	0.68	849.8	[41, 42]
玉龙雪山	27°, 100°	2393	17.7	950	4800	5026	1.9	950	5076	1.6	950	5176	1	950	[43]
螺髻山	27°, 102°	2640	15.8	956		4940	2.0	956	5005	1.61	956	5103	1.02	956	*
点苍山	100°, 26°	1990	19.8	1054		4905	2.31	1054	4980	1.86	1054	5068	1.33	1054	[41]
拱王山	26°, 103°	3900	6.8	1570		4488	3.27	1570	4558	2.85	4558	4553	2.88	1570	[44]
台湾玉山	23°, 120°	3845	7.4	3054		4361	4.3	3054	4328	4.5	3054	3953	6.75	3054	[14]

*琼海-螺髻山风景名胜区总体规划,四川省城乡规划设计研究院,2006。

1.1.2 确定现代平衡线处的气温 (T_2) P_2 确定之后, 根据苏珍统计的中国西部现代冰川平衡线处年降水量和夏季6~8月平均气温的推算值绘制的曲线^[1], 查出对应 P_2 降水量的夏季平衡气温值 (T_2)。

1.1.3 确定现代平衡线和气象站之间的气温差 (ΔT) 将气象站6-8月的平均气温 (T_1) 与现代平衡线处的气温 (T_2) 作差。

1.1.4 确定现代平衡线和气象站之间的高差 ΔH 用现代平衡线和气象站之间的气温差 (ΔT) 除以气温垂直递减梯度 (G 取 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)。

1.1.5 确定现代平衡线高度 (H) 用气象站的高度 (H_1) 加上高差 (ΔH), 即为所求。

1.2 最大降水带与统计公式法 (Maximum Precipitation Formula, 简称MPF法)

用MPF法确定现代平衡线高度与MPC法的原理完全相同, 只不过是在MPC法中,对应2000 m处降水的夏季平均气温值 (T_2) 是采用的苏珍^[7]根据中国西部冰川实际资料绘制的气温与降水关系图, 这样在确定 T_2 的过程中,难免会存在曲线判读的误差。而在MPF法中, 这种现代理论平衡线处的气温和降水关系被进一步量化, 比较有影响的是赖祖铭根据间接推算的中国西部山区16条冰川及巴基斯坦境内巴托拉冰川平衡线处6~8月平均气温 (T_{so}) 和年降水量 (P_{EL}) 资料绘制的相关曲线^[5], 施雅风将此曲线转化成数学公式(6):

$$T_{so} = -15.4 + 2.48 \ln P_{EL} \tag{6}$$

在实际应用MPF法计算现代平衡线过程中, 只需将MPC法中的公式 (2) 用MPF法中的公式 (6) 代替, 即 $T_2 = -15.4 + 2.48 \ln P_2$, 从而求出现代平衡线处的气温 (T_2)。

1.3 实际气象站降水与经验公式法(Weather station Precipitation Formula, 简称WPF法)

近年来,一些学者^[12-14]在计算现代平衡线时,多采用Ohmura^[4]根据中高纬度70条现代平衡线处的观测值获得的统计公式 (7):

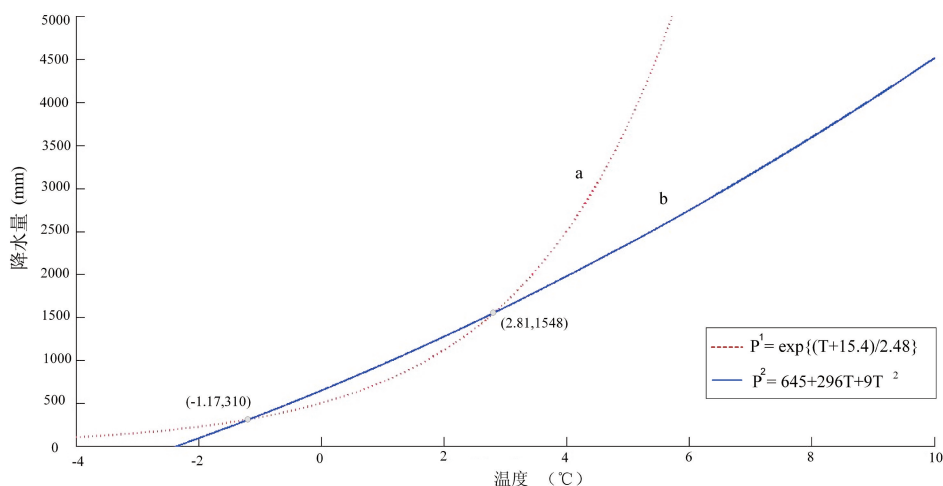


图2 不同地区 (中国西部和欧洲) 冰川平衡线处气温与降水关系

Fig. 2 Curve of the relationship between the temperature and precipitation of the glacial equilibrium line in different regions (western China and Europe)

$$P = 645 + 296T + 9T^2$$

(7)

与MPC法和MPF法不同的是,在确定现代平衡线高度过程中,平衡线处降水(P₂)应用的是气象站的降水数据(P₁),即P₂ = P₁,然后将MPC法中的公式(2)用WPF法中的公式(7)所代替,进而求出相应平衡线高度处的气温值(T₂),接下来用公式(3)、(4)、(5)求出现代平衡线高度。

2 现代冰川平衡线的影响因素分析

采用中国东部和青藏高原外围17座典型山体附近的气象站资料(图1),利用上面所述的三种方法恢复了现代理论平衡线高度(表1)。

2.1 平衡线处降水量的选取对计算结果的影响

三种方法计算现代理论冰川平衡线的思路大体相同,只是平衡线处很少设置气象站,因而平衡线处的降水和气温资料都是间接推算或假设的,并非平衡线处的真实降水量。其中,MPC、MPF法将2000 m处的年平均降水量作为平衡线处的降水量,WPF法将平衡线处的降水默认为已知气象站处的降水数据。值得注意的是,施雅风在应用MPC和MPF法计算现代平衡线时,并未明确指出该如何根据气象站的资料计算现代冰川平衡线处的降水,但他在实际计算过程中,已经进行了分类,即如果气象站分布的海拔低于2000 m,则根据降水梯度推算出2000 m处的降水数据;如果气象站分布的海拔高于2000 m,则直接应用气象站的降水数据进行计算。而在WPF法中,平衡线处的降水采用离平衡线最邻近的气象站数据。由此不难看出,平衡线处的降水数据的选取成为三种方法计算现代理论平衡线不同的一个主导因素。

施雅风^[1]采用2000 m高度的降水数据作为中国东部现代冰川平衡线处的降水量,是慎重考虑了雪线处的降水量较难确定,而且中纬度山区最大降水带一般在2000 m左右的实际情况,并指出计算结果可能较实际偏低一些,然而,中纬度最大降水高度一般在2000 m是否是一个普遍规律?如果是,这一适用于中纬度地区的一般规律是否也实用于低纬度地区?值得讨论。所谓最大降水高度^[32]指的就是降水量达到最大时的海拔高度,在一定海拔高度范围内,降水量随高度升高而增加是个普遍规律,超过一定的海拔高度再向上,就会出现相反的情况。最大降水高度各地不同,主要与气候干湿程度和山体高度有关。气候

越干燥的地方，最大降水高度越高，甚至可能不出现最大降水高度，即最大降水高度已过山顶。气候越湿润的地方，最大降水高度越低，甚至可以低到山麓。对于中国东部中纬地区来说，如吉林省长白山^[16] (2691 m)、宁夏内蒙交界的贺兰山^[24] (3556 m)，均为存在确切的末次冰期的冰川作用的山地，两个山体的降水量均随着海拔高度的增加而增大，长白山天池气象站 (2624 m) 年均降水量为 1340 mm，而贺兰山气象站 (2901 m) 的年均降水量为 430 mm，其最大降水带均不在 2000 m 的海拔高度上。中纬度的阿尔泰山，其最大降水高度在 3190 m^[33]。而对于低纬度山地来说距离这一规律的偏差就更大，如云南白马雪山^[34] 的最大降水带分布在海拔 3700~3800 m，根据 122 道班 (3760 m) 的资料，年平均降水量为 946.1 mm，而位于 2050 m 的奔子栏气象站数据则是 285.6 mm，其差值为 660.5 mm，这个差值比 2000 m 处的降水大 2 倍还多；云南拱王山 3900 m 处的降水为 1570 mm，比 2000 m 高度上的 989 mm 高出了 581 mm，可见最大降水带的高度不一定位于海拔 2000 m 上，在有的地区这个误差还是非常明显的。

此外，MPC 法和 MPF 法中将 2000 m 处的降水值作为平衡线处的降水值，如果 2000 m 果真是这个山体的最大降水高度，则平衡线处的实际降水量一定低于此值，这样会导致计算出的平衡线处的气温偏高，进而使现代理论平衡线的值偏低。至于 WPF 法将现代理论平衡线处的降水默认为邻近气象站处的降水，则恢复的现代理论平衡线高度主要取决于降水数据落在哪个区间 (图 2)，若降水量介于 310 mm 和 1548 mm，则 MPF 恢复的平衡线高度低于 WPF；若降水量低于 310 mm 或者高于 1548 mm，则情况相反。

2.2 冰川平衡线处的气温与降水关系式的选取对计算结果的影响

上述三种方法是根据不同地区冰川资料进行的统计分析，因此得到的平衡线处 6-8 月

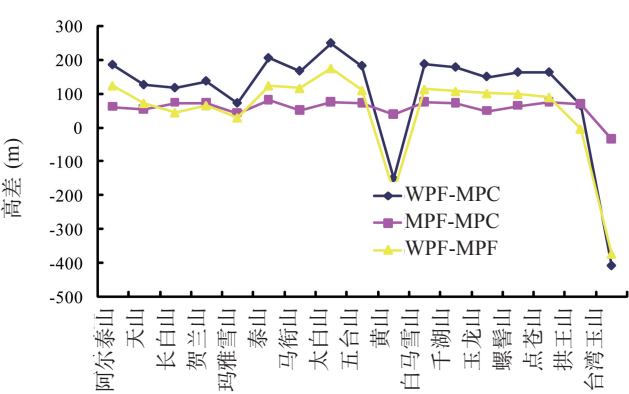


图3 不同方法计算的平衡线高差

Fig. 3 The height difference of ELAs for different methods

表2 各气象站气象数据以及应用 WPF 法计算的现代平衡线

Tab. 2 Meteorological data of different meteorological stations and modern theory ELAs using WPF

观测站	海拔 (m)	年降水量 (mm)	夏季气温 (°C)	现代理论平衡线 处气温值 (°C)	夏季气温递减率 (°C/100m)	现代理论平衡 线高程 (m)
奔子栏	2050	285.6	23.7	-1.3	0.75	5378
东竹林	2988	532.8	16.5	-0.4	0.78	5152
122道班	3760	946.1	10.0	1.0	0.75	4961
白马雪山垭口	4292	807.1	5.1	0.5	0.76	4893
飞来寺	3485	513.8	11.3	-0.4	0.72	5117
向阳坡	2747	410.6	17.4	-0.8	0.69	5386
日嘴	2080	425.0	21.7	-0.8	0.69	5335
布尔津	474	117.4	22.5	-1.9	0.59	4609
哈巴河	533	172.0	21.6	-1.7	0.59	4479
阿勒泰	735	174.0	21.2	-1.7	0.59	4611
富蕴	803	157.7	22.8	-1.7	0.59	4962
青河	1218	158.9	18.6	-1.7	0.59	4663
森塔斯	1900	664.0	11.9	0.1	0.59	3907

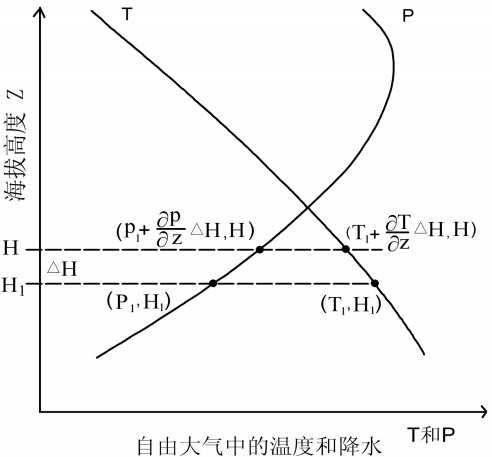
注：奔子栏、东竹林、122道班位于白马雪山东坡，白马雪山垭口位于分水岭，飞来寺、向阳坡、日嘴位于白马雪山西坡，布尔津、哈巴河、阿勒泰、富蕴、青河、森塔斯均位于阿尔泰山附近。

气温与年降水的关系也不尽相同。其中，公式 $T_{so} = -15.4 + 2.48 \ln P_{EL}$ ^[5]表示的是气温与降水之间的对数关系，而Ohmura^[4]统计出来的公式 $P = 645 + 296T + 9T^2$ 是幂函数关系，显然，二者的横纵坐标正好相反，对此，我们稍作变换，将公式 $T_{so} = -15.4 + 2.48 \ln P_{EL}$ 改写为降水P关于气温T的函数，即 $P = e^{(T+15.4)/2.48}$

根据Ohmura和施雅风两人提出的现代冰川平衡线处气温和降水的关系图^[4-5]可知，平衡线处的气温与降水关系并不是无条件成立的，即前者适用的气温和降水范围是 $[-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}, 10\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 和 $[0, 5000\text{ mm}]$ ，后者为 $[-2\text{ }^{\circ}\text{C}, 5\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 和 $[0, 3000\text{ mm}]$ 。我们将这两条曲线进行统一处理后显示在一幅图上(图2)，可以看出，每条曲线上气温的升高都有个极大值，超过此极值，降水将由固态转为液态，无助于积累的增加。相反，两条曲线的气温也有个极小值($-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右)，当夏季温度低于 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，即使没有降水，冰川仍能够得以维持。

从图2也可看出，两条曲线有两个交点，交点坐标分别为 $(-1.17, 310)$ 和 $(2.81, 1548)$ ，当降水介于310 mm和1548 mm之间时，气温相同的点，b曲线对应的降水多于a曲线对应的降水。表1中的长白山、新疆天山、阿尔泰山、贺兰山、陕西太白山、甘肃玛雅雪山、马衔山、四川螺髻山、白马雪山、云南千湖山、玉龙雪山、点苍山、山东泰山、山西五台山均显示了此规律；当降水低于310 mm或高于1548 mm时，b曲线位于曲线a之下，也就是说，即使两条曲线降水相同的点，b对应的气温也高于a对应的气温，如表1中的台湾玉山、云南拱王山和安徽黄山。随着降水的增加，两个公式计算的气温差距越来越大。

以上分析可以看出，即使计算现代理论冰川平衡线时选取的降水数据相同，选用的方法不同，计算出的平衡线处6-8月气温也不同，进而使气象站处的气温和冰川平衡线处的气温差不同，相应的气象站高度和平衡线高度之间的高差不同，导致计算的冰川平衡线高度不同。以玛雅雪山为例(表1)进行具体说明，应用三种方法计算现代理论冰川平衡线时均取降水量355.4 mm，得到的气温分别为 $-0.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.83\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与气象站的气温差分别为 $10.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $11.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，均采用 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的气温递减率，相应的气象站和平衡线之间的高差为1811 m、1855 m、1883 m，从而计算的现代理论平衡线高度分别为4856 m、4900 m、4928 m。在参与计算的山地中，除了太白山、马衔山、阿尔泰山平衡线处的降水不同以外，其余的山地平衡线处的降水均相同，但是计算出来的现代理论平衡线高度却有一定的差别(图3)。用白马雪山、阿尔泰山、玉龙雪山和天山地区的气象资料计算现代冰川平衡线，并与实际观测的冰川平衡线进行比较，说明采用MPF法比WPF法恢复出来的冰川平衡线高度更符合实际情况。



H₁-气象站的海拔高度；P-自由大气中的降水；T-自由大气中的气温；Z-海拔高度；P₁、T₁-海拔高度为H₁处气象站的降水和气温；ΔH-海拔高度的变化量；H-冰川平衡线处的海拔高度；∂P/∂zΔH-降水变化量；∂T/∂zΔH-气温变化量

图4 自由大气中降水、气温和海拔高度的关系

Fig. 4 The relationship between precipitation and temperature in the free atmosphere

3 不同气象站的气温与降水数据对计算现代冰川平衡线的影响

为了便于讨论不同气象站的气温与降水数据对现代平衡线计算的影响，统一采用WPF法计算现代冰川平衡线(表2)。从中可以看出，由于不同气象站所处的海拔高度、气

温与降水不同，因此，计算出的现代冰川平衡线高度也不同。

从表2可以看出，122道班气象站的降水比白马雪山垭口气象站多，计算出冰川平衡线位置应该更低。但是，实际结果却是应用122道班气象站数据计算的现代理论冰川平衡线高。其原因是气象站本身高度不同，也就是说并非降水量越大求出的现代理论冰川平衡线越低，还需要考虑气象站本身所处的海拔高度。将应用白马雪山不同海拔高度气象站数据计算出的现代冰川理论平衡线与实际观测值(4800 m)对比，发现采用越接近现代理论平衡线处的气象站资料，计算的现代冰川理论平衡线值越接近实际。对白马雪山的现代冰川理论平衡线研究发现，从山下2050 m的奔子栏气象站到山上4292 m的白马雪山垭口气象站，冰川平衡线从5386 m到4893 m，相差近500 m，可见气象站的选取对于现代冰川理论平衡线的计算有较大影响。

此外，气象站是位于山上还是山外对计算结果也有一定影响。以阿尔泰山为例，只有森塔斯气象站(1900 m)属于高山气象站，故而计算出来的现代理论平衡线值最低，并且比较接近实际情况，而应用地面气象站数据的计算结果就比实际高很多。原因可能是山上和山外气象站所记录的气温和降水有很大差异的缘故，资料显示，地面气象站的降水量远远低于山上气象站的降水，很可能已经不在同一个量级上^[45]。

4 气温垂直递减梯度

为了便于对比，表1均采用0.6 °C/100 m的气温垂直递减梯度，然而，对于不同的山体来说，由于高度、地形、坡向的不同，导致山体表面的气温垂直递减梯度会与此数据有一定的出入，如在计算白马雪山的现代冰川平衡线时，采用白马雪山垭口(4292 m)气象站的数据，其中实测气温垂直递减梯度为0.76 °C/100 m，计算的现代理论冰川平衡线值是4893 m，若以0.6 °C/100 m计算，则现代冰川平衡线值为5053 m，即由于气温垂直递减梯度不同，导致计算的结果相差160 m。再比如，在近南北走向的贺兰山地区，根据实测资料，东西坡的气温垂直递减梯度分别为0.52 °C/100 m和0.55 °C/100 m^[46]，计算出来的现代平衡线高度分别为5074 m和4935 m，与采用0.6 °C/100 m计算出的平衡线高度(4784 m)之间的差值达290 m和151 m。

5 计算冰川平衡线综合因子法

综合分析上述计算现代理论冰川平衡线方法，下面给出比较合理的计算方法。

图4指示了自由大气中的降水、气温和高度之间的关系，气象站的海拔高度为 H_1 ，对应的降水 P_1 和气温 T_1 ，随着海拔高度增加了 ΔH ，达到冰川平衡线高度 H ，相应的降水变化量为 $\partial P/\partial z \Delta H$ ，气温变化量为 $\partial T/\partial z \Delta H$ ，则平衡线处的降水(P_2)和气温(T_2)分别为 $p_1 + \partial P/\partial z \Delta H$ ， $T_1 + \partial T/\partial z \Delta H$ 。已知平衡线处的气温和降水的函数关系式为：

$$f(T,P) = 0 \tag{8}$$

公式(8)可以是已知的现代冰川平衡线处的气温与降水函数关系，如公式(6)或者公式(7)，也可以是实际观测统计的关系式。用气象站的气温(T_1)、降水数据(P_1)、气温梯度($\partial T/\partial Z$)和降水梯度($\partial P/\partial Z$)来表示平衡线处的气温和降水，带入公式(8)，则该函数关系可表示为

$$f(T_1 + \frac{\partial T}{\partial Z} \Delta H, P_1 + \frac{\partial P}{\partial Z} \Delta H) = 0 \tag{9}$$

利用公式(9)便可以求出现代平衡线和气象站的高差，从而求出现代冰川平衡线的高度。由于上述方法将各因子统一考虑，我们把上述方法命名为综合因子法(Zonghe Yin

Zi, 简称 ZYZ 法)。

在利用 ZYZ 法计算现代理论冰川平衡线时, 无需像上述三种方法那样繁琐, 需要多个步骤最终求出现代冰川平衡线高度, 而只需将气象站处的气温降水数据和气温递减梯度以及降水梯度直接代入公式 (9), 求出现代理论冰川平衡线和气象站的高差, 进而求出现代理论冰川平衡线的高度。

下面采用 ZYZ 法, 以白马雪山为例进行验证, 选取白马雪山垭口的气象数据, 气温 5.1 °C, 降水 807.1 mm, 气温梯度 0.78 °C/100 m, 降水梯度利用白马雪山垭口气象站 (4292 m) 和 122 道班气象站 (3760 m) 推算, 其值为 26 mm/100 m, 选用公式 $T_{s0} = -15.4 + 2.48 \ln P_{EL}$ 和公式 (9) 得 $\Delta H = 500$ m, 计算出白马雪山的现代平衡线高度为 4792 m, 这与实际观测的平衡线高度 4800 m 几乎一致, 故而本文提出的计算现代理论冰川平衡线高度的方法是合理的。

尽管说公式 (9) 比较简洁, 含义也比较清楚, 进一步分析也可看出, 该模型仍存在计算误差, 主要表现在:

① 降水梯度。对于冰川平衡线处的降水, 理论上应该为 $p_l + \partial P / \partial z \Delta H$, 由于某些高山区存在最大降水带和第二最大降水带, 因而降水梯度需要分段考虑。

② 现代冰川平衡线处的气温与降水关系。我们选择阿尔泰山、天山、白马雪山和玉龙雪山四处发育现代冰川的山体进行对比, 结果表明, 应用公式 $T_{s0} = -15.4 + 2.48 \ln P_{EL}$ 比公式 $P = 645 + 296T + 9T^2$ 更接近实际观测的现代冰川平衡线高度 (表 1)。由此可以看出, 在计算青藏高原外围及中国东部典型山地的现代理论冰川平衡线时, 应首选公式 $T_{s0} = -15.4 + 2.48 \ln P_{EL}$ 代表现代冰川平衡线处的气温与降水关系。

③ 气温垂直递减率。应尽可能地选取山体的实测气温递减率。

6 结论

(1) 对近年来常用的恢复现代理论冰川平衡线的方法、原理、及计算过程中可能存在的误差来源进行分析, 讨论了计算现代理论冰川平衡线的主要影响因素, 提出了比较完善的计算现代冰川平衡线的 ZYZ 方法, 并通过实测气象数据进行方法验证。

(2) 三种方法推算的平衡线高度均高于实际平衡线, 即实际平衡线高度 < MPC 法 < MPF 法, 但 WPF 法恢复的现代理论平衡线高度主要取决于降水数据所处的区间, 若降水量介于 310 mm 和 1548 mm, 则 MPF 法恢复的平衡线高度低于 WPF 法; 若降水量低于 310 mm 或者高于 1548 mm, 则情况相反。总体而言, 采用不用方法恢复的现代理论平衡线高度是西部高、东部低。

(3) 在实际计算过程中, 应注意降水梯度和气温垂直递减率的选取。尤其是存在第二大降水带的高山区, 降水梯度应该分段选取。同时, 应选取山体的实测气温垂直递减率。

致谢: 感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所苏珍、蒲健辰、丁良福研究员对本文所提出的宝贵意见!

参考文献 (References)

[1] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Li Jijun et al. Glaciations and Environmental Variations in East China. Beijing: Science Press, 1989: 1-462. [施雅风, 崔之久, 李吉均 等. 中国东部第四纪冰川与环境问题. 北京: 科学出版社, 1989: 1-462.]
[2] Liu Gengnian, Li Yingkui, Chen Yixin 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, Li Y K, 陈艺鑫 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.]
[3] 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.]
- [4] Ohmura A, Kasser P, Funk M. Climate at the equilibrium line of glaciers. *Journal of Glaciology*, 1992, 38: 397-411.
- [5] Shi Yafeng, Huang Maohuan, Ren Binghui. *An Introduction to the Glaciers in China Contents*. Beijing: Science Press, 1988: 23-24. [施雅风, 黄茂桓, 任炳辉. 中国冰川概论. 北京: 科学出版社, 1988: 23-24.]
- [6] Shi Yafeng, Huang Maohuan, Yao Tandong et al. *Glaciers and Their Environments in China: The Present, Past and Future*. Beijing: Science Press, 2000: 1-420. [施雅风, 黄茂桓, 姚檀栋 等. 中国冰川与环境: 现在、过去和未来. 北京: 科学出版社, 2000: 1-420.]
- [7] Su Zhen. A view on Quaternary glaciation in Lushan from the results of some modern glacial researches. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1984, 6(2): 83-88. [苏珍. 从我国现代冰川研究的一些结果看庐山第四纪冰川问题. 冰川冻土, 1984, 6(2): 83-88.]
- [8] Iwata S, Yagi H, Fen Yaozong. Glacial extent and ELAs during the Last Glacial period in Yunnan province, China// *Proceedings of the International Symposium on Paleo-environmental change in Tropical-subtropical Monsoon Asia*. Special Publication, 1995, 24: 113-123.
- [9] Benn D I, Lehmkuhl F. Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. *Quaternary International*, 2000, 65/66: 15-29.
- [10] Porter S C. Snowline depression in the tropics during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20: 1067-1091.
- [11] Ono Y, Aoki T, Hasegawa H. Mountain glaciation in Japan and Taiwan at the global Last Glacial Maximum. *Quaternary International*, 2005, 138/139: 79-92.
- [12] Zhang Wei, Cui Zhijiu, Yan Ling. Present and Late Pleistocene equilibrium line altitudes in Changbai Mountains, Northeast China. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(3): 373-383.
- [13] Ono Y, Shulmeister J, Lehmkuhl F et al. Timings and causes of glacial advances across the PEP-II transect (East-Asia to Antarctica) during the last glaciation cycle. *Quaternary International*, 2004, 118/119: 55-68.
- [14] Hebenstreit R. Present and former equilibrium line altitudes in the Taiwanese high mountain range. *Quaternary International*, 2006, 147: 70-75.
- [15] Xu X K, Wang L Q, Yang J Q. Last glacial maximum climate inferences from integrated reconstruction of glacier equilibrium-line altitude for the head of the head of the Urumqi River. *Quaternary International*, 2010, 218: 3-12.
- [16] Zhang W, Niu Y B, Yan L et al. Late Pleistocene glaciations of Changbai Mountains in northeastern China. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53: 2672-2684.
- [17] Hebenstreit R, Bose M, Murray A. Late Pleistocene and early Holocene glaciations in Taiwanese mountains. *Quaternary International*, 2006, 147: 76-88.
- [18] Hebenstreit R, Bose M. Geomorphological evidence for a Late Pleistocene glaciation in the high mountains of Taiwan dated with age estimates by optically stimulated luminescence (OSL). *Zeitschrift für Geomorphologie N F. Suppl.-Bd*, 2003, 130: 31-49.
- [19] Cui Z J, Yang C F, Liu G N et al. The Quaternary glaciation of Shesan Mountain in Taiwan and glacial classification in monsoon areas. *Quaternary International*, 2002, 97/98: 147-153.
- [20] Cui Zhijiu, Yang Jianfu, Liu Gengnian et al. Discovery of Quaternary glacial evidence of Snow Mountain in Taiwan, China. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(6): 566-571.
- [21] Cui Zhijiu, Yi Chaolu, Yan Jingfu. Quaternary glaciations in the Halasi River catchment and its surroundings in the Altai Mountains in Xinjiang, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14(4): 342-351. [崔之久, 易朝璐, 严竞浮. 新疆阿尔泰山哈纳斯河流域及其邻域第四纪冰川作用. 冰川冻土, 1992, 14(4): 342-351.]
- [22] Zhao Jingdong, Liu Shiyin, Wang Jie et al. Glacial advances and ESR chronology of the Pochengzi Glaciation, Tianshan Mountains, China. *Science in China: Series D*, 2009, 39(12): 1681-1687. [赵井东, 刘时银, 王杰 等. 天山破城子冰期的冰进及ESR年代学研究. 中国科学: D 辑, 2009, 39(12): 1681-1687.]
- [23] Ren Binghui. On the problem of Quaternary glaciations and periglacial phenomena in mountains near Lanzhou. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(1): 19-25. [任炳辉. 兰州地区附近山地第四纪冰川与冰缘问题. 冰川冻土, 1981, 3(1): 19-25.]
- [24] Zhang W, He M Y, Li Y H et al. Quaternary glacier development and the relationship between the climate change and tectonic uplift in the Helan Mountain. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57: 4491-4504.
- [25] Liu Yong, Li Jijun. Late Quaternary glaciers and environment of Maxian Mt., Gansu Province//Li Jijun. *Quaternary Glacier and Environment Research in West China*. Beijing: Science Press, 1991: 46-56. [刘勇, 李吉均. 马衔山晚第四纪冰川与环境//李吉均. 中国西部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社, 1991: 46-56.]
- [26] Zhang Wei, Liu Beibei, Li Yonghua et al. Quaternary glacier development and environmental evolution in Qianhu

- Mountain, northwestern Yunnan Province. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 657-670. [张威, 刘蓓蓓, 李永化 等. 云南千湖山第四纪冰川发育特点与环境变化. *地理学报*, 2012, 67(5): 657-670.]
- [27] Wu Zhonghai, Zhang Shuangyong, Hu Daogong et al. Discussion on the dynamical mechanism and effect for normal fault in late Quaternary of eastern Haba-Yulongxueshan fault. *Science in China: Series D*, 2008, 38(11): 1361-1375. [吴中海, 张永双, 胡道功 等. 滇西北哈巴—玉龙雪山东麓断裂的晚第四纪正断层作用及其动力学机制探讨. *中国科学: D辑*, 2008, 38(11): 1361-1375.]
- [28] Cui Zhijiu, Xie Youyu, Li Hongyun. Paleoglacial traces and series of mutiglaciation in the Luojieshan Mountain. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1986, 8(2): 107-118. [崔之久, 谢又予, 李洪云. 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): 107-118.]
- [29] Yang J Q, Cui Z J, Yi C L et al. "Tali Glaciation" on Massif Diancang. *Science in China: Series D*, 2007, 50: 1685-1692.
- [30] Kuang Mingsheng, Li Jijun, Zhao Yu et al. A study on the Quaternary glacial relics in the Gongwang Mountains in the northeast part of Yunnan Province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19(4): 366-372. [况明生, 李吉均, 赵瑜 等. 云南省东北部拱王山第四纪冰川遗迹研究. *冰川冻土*, 1997, 19(4): 366-372.]
- [31] Kerschner K. Quantitative paleoclimatic inferences from late glacial snowline, timberline and rock glacial data Tyrolean Alps Australia. *Zeitschrift Gletscherkunde und Glacial Geologies*, 1985, Bd 21: 363-369.
- [32] Lin Zhiguang, Zhang Jiacheng. *Climate of China*. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 1985. [林之光, 张家诚. *中国的气候*. 西安: 陕西人民出版社, 1985.]
- [33] Zhao Chengyi, Shi Fengzhi, Sheng Yu et al. Regional differentiation characteristics of precipitation changing with altitude in Xinjiang region in recent 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1203-1213. [赵成义, 施枫芝, 盛钰 等. 近50 a来新疆降水随海拔变化的区域分异特征. *冰川冻土*, 2011, 33(6): 1203-1213.]
- [34] Zhang Yiguang. Several issues concerning vertical climate of the Hengduan Mountains. *Resources Science*, 1998, 20(3): 12-19. [张道光. 横断山区垂直气候的几个问题. *资源科学*, 1998, 20(3): 12-19.]
- [35] Xu Xiangke. Late Pleistocene glacial geomorphology and dating in Kanas river valley, Altai Mountains [D]. Beijing: Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, 2010: 1-116. [许向科. 阿尔泰山喀纳斯河流域晚更新世冰川地貌与冰期序列测年[D]. 北京: 中国科学院青藏高原研究所, 2010: 1-116.]
- [36] Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Wenbin et al. Change processes and characteristics of mass balance of the Urumqi glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains, during 1959-2009. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6): 1301-1309. [张国飞, 李忠勤, 王文彬 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川1959-2009年物质平衡变化过程及特征研究. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1301-1309.]
- [37] Wang Bin, Chen Yaming, Zhou Zhiyu. Study of soil nitrogen mineralization at different altitudes on western slopes of Helan Mountains, China. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(3): 483-490. [王斌, 陈亚明, 周志宇. 贺兰山西坡不同海拔梯度上土壤氮素矿化作用的研究. *中国沙漠*, 2007, 27(3): 483-490.]
- [38] Sun Guojun, Zhao Songling. The study on vegetation of Mahan Mountains in Gansu. *Acta Botanica. Boreali-Occidentalia. Sinica*, 1995, 15(5): 115-120. [孙国钧, 赵松岭. 甘肃省马衔山地区植被特征分析. *西北植物学报*, 1995, 15(5): 115-120.]
- [39] Dai Junhu, Cui Haiting, Tang Zhiyao et al. Characteristics of alpine physical environment on Taibai Mountain. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(4): 299-305. [戴君虎, 崔海亭, 唐志尧 等. 太白山高山带环境特征. *山地学报*, 2001, 19(4): 299-305.]
- [40] Ren Jianmei, Niu Junjie, Hu Caihong et al. Tourism climate and evaluation of comfortableness in Wutai Mountain. *Geographical Research*, 2004, 23(6): 856-862. [任健美, 牛俊杰, 胡彩虹 等. 五台山旅游气候及其舒适度评价. *地理研究*, 2004, 23(6): 856-862.]
- [41] Wang Yu. *Introduction of the Climate Change of Yunnan*. Beijing: China Meteorological Press, 1996: 53-58. [王宇. *云南气候变化概论*. 北京: 气象出版社, 1996: 53-58.]
- [42] Ming Qingzhong, Su Huai, Shi Zhengtao et al. Last five Heinrich events revealed by lacustrine sediments from Xiaozhongdian Basin in Yunnan Province. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 123-130. [明庆忠, 苏怀, 史正涛 等. 云南小中甸盆地湖相沉积记录最近的5次Heinrich事件. *地理学报*, 2011, 66(1): 123-130.]
- [43] Li Jijun, Su Zhen. *Glaciers in the Hengduan Mountains*. Beijing: Science Press, 1996: 1-282. [李吉均, 苏珍. *横断山冰川*. 北京: 科学出版社, 1996: 1-282.]
- [44] Zhang Wei, Cui Zhijiu, Guo Shanli et al. *Glacier and Environment during the Last Glacial of Mountain in Northeast of Yunnan Province*. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2005: 1-228. [张威, 崔之久, 郭善莉 等. *滇东北高山末次冰期冰川与环境*. 北京: 知识产权出版社, 2005: 1-228.]
- [45] Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin et al. *Glaciers of Xizang (Tibet)*. Beijing: Science Press, 1986: 1-352. [李吉均, 郑本兴, 杨锡金 等. *西藏冰川*. 北京: 科学出版社, 1986: 1-352.]

[46] Geng Kan, Yang Zhirong. Climatic characteristics and climatic landforms in Helan Mountain. Yantai Teachers' College Journal: Nature Science Edition, 1990, 6(2): 49-56. [耿侃, 杨志荣. 贺兰山气候特征与气候地貌. 烟台师范学院学报: 自然科学版, 1990, 6(2): 49-56.]

Theoretical glacial equilibrium line altitudes and their influencing factors in the typical mountains of China

ZHANG Wei¹, LIU Beibei¹, CUI Zhijiu², LI Yangyang¹, LIU Liang¹

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China;
2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: It is important to reconstruct the past environmental changes for unglaciated area in the typical mountains of the Tibetan Plateau and in eastern China by using modern theoretical equilibrium line altitudes (ELAs). Based on the data from 28 meteorological stations of 17 typical mountains, the ELAs were calculated by the methods of Maximum Precipitation Zone and Empirical Curve (MPC), Maximum Precipitation Zone and Empirical Formula (MPF) and Meteorological Precipitation and Empirical Formula (WPF). Research results show that, MPF is better than WPF through the comparison of the applicability between these two methods in the study areas. The results also indicate that the factors affecting the ELAs are precipitation, temperature, altitude of the meteorological stations and lapse rate of temperature. Based on the in-depth analysis of the principle, parameter selection, computational process and error sources, the authors put forward a newly improved method for calculating modern theoretical ELAs.

Key words: equilibrium line altitudes (ELAs); Tibetan Plateau; lapse rate of precipitation; temperature; glacier