

# 美国山地降水量垂直分布的研究

孙 安 健

(国家气象局气候资料室)

**提 要:** 根据美国西部山地资料, 依据宏观地理因素和局地海拔高度因素从各种气候区域和不同纬度上选择典型坡地研究了降水的垂直分布规律。

**主题词:** 山地降水垂直分布 美国

关于山地降水量垂直分布问题的研究, 国内外许多学者已做了不少工作。大量的研究成果指出, 在自然条件比较均一的山地, 降水量一般都随地方海拔升高而增加, 至某一高度达到最大值以后, 才转为向上减少。而且这个最大降水量高度还随地理环境和气候状况而变化。在此最大降水量高度以上, 一般没有造成第二次降水量再增加的条件<sup>1)</sup>〔1-8〕。近来, 随着山地气候研究的进展, 相继发现了某些坡地上存在第二最大降水量高度的观测事实, 并对可能形成的原因作了初步的探讨〔9-14〕。但是, 由于受到山地区域台站网密度的限制, 山地降水量随高度的分布特征至今还研究得不够充分。

美国西部地形是以纵列着南北走向的高大山系为特征的, 其间分布着高原和盆地。这一区域的台站网密度相对于其他国家的山地来说要密一些。因此, 我们利用美国这一地区的降水量资料来进一步研究山地降水量垂直分布的规律。考虑到降水量的年际变化比较大, 在本文中采用了1951—1980年平均降水量资料。

## 一、各山地坡面的选择和测点位置

任何一地的气候特点都是由宏观地理因素(山脉走向、总体高度和长度以及地理位置)、局地海拔高度和小地形(地形形态、坡地方位等)三者所决定。而宏观地形因素在空间上的分布具有一定的规律, 受其影响的气候的空间分布也有一定的规律。局地海拔高度对气候影响的规律则比较简单。可是, 小地形因素在空间上的分布则没有什么规律, 相应地受它影响的气候的空间分布也无规律可寻。鉴此, 我们主要依据宏观地理因素和局地海拔高度因素从各种气候区域和不同纬度上选择典型的坡地来揭示降水量的垂直分布规律。所选的这些坡地是: 1. 喀斯喀特(Cascades)山地西坡(47°N, 121—122°W, 5) 2. 内华达(Sierra Nevada)山地39°N和37°N西坡(37—39°N, 118—121°W, 14) 3. 落基山(Rocky)地西南坡和东坡(38—45°N, 103—106°W, 13) 4. 科罗拉多(Colorado)高原东坡、

本文1987年6月12日收到, 1988年1月14日收到修改稿。

1) 四川省气象局气候资料室: 用西高原降水量垂直变化的初步分析和新疆维吾尔自治区, 新疆主要山地降水随高度分布规律的初步分析, 1974年。

西南坡和南坡 (34—39°N, 105—101°W, 15) 5. 阿巴拉契亚 (Appalachian) 山地西坡和东南坡 (34—39°N, 79—82°W, 9) 1)

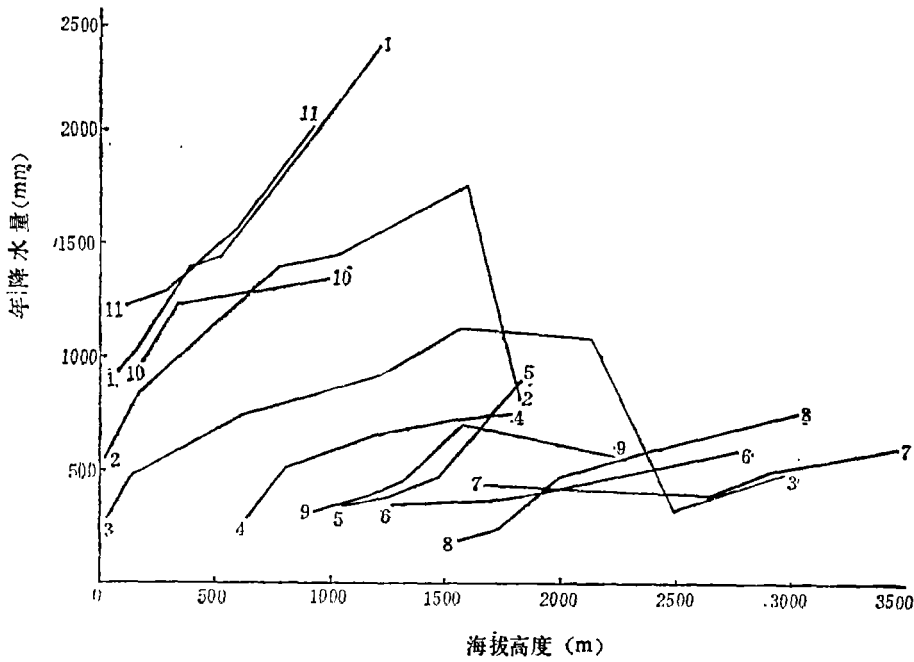


图 1 年降水量随高度的分布

Annual Precipitation distribution with height

- |             |                |                |              |
|-------------|----------------|----------------|--------------|
| 1. 喀斯喀特山地西坡 | 2. 内华达山地39°N西坡 | 3. 内华达山地37°N西坡 | 4. 落基山地西南坡   |
| 5. 北部落基山地东坡 | 6. 南部落基山地东坡    | 7. 科罗拉多高原东坡    | 8. 科罗拉多高原西南坡 |
| 9. 科罗拉多高原南坡 | 10. 阿巴拉契亚山地西坡  | 11. 阿巴拉契亚山地东南坡 |              |

## 二、各山地降水量垂直分布特征

山地降水量的垂直分布是十分复杂的, 它并不总是简单地随高度线性地增加, 而是和坡地的地理位置、坡向以及季节等因素有着密切的关系。图 1 给出了各山地坡地年降水量随高度的分布。这里可以划分为四种类型:

1. 喀斯喀特山地西坡、落基山地西南坡和东坡、科罗拉多高原西南坡、阿巴拉契亚山地西坡和东南坡, 年降水量都是自山麓往上随高度而逐渐增加, 并未发现最大降水量高度的存在。其原因于气候湿润的坡地是高度不高所致; 于其他坡地则是气候比较干燥的缘故。不过, 落基山地西南坡和科罗拉多高原西南坡在多雨季节 (11—2 月) 还是存在最大降水量高度的, 其高度各为 1500m 和 2700m。

1) 限于篇幅, 各山地测站, 只列出了其经纬度范围及站数, 具体位置及高度发表时删略。——编者注

2. 科罗拉多高原东坡位于太平洋西风气流的背风面,且海拔高度很高,焚风效应较强;低坡处则可以受到来自大西洋上的东南气流的影响;这二者的影响结果使得坡地中部最为干燥。故而年降水量先是自山麓随高度而减少,然后才随高度而增加,虽然该坡地山顶测站高度为3500m,也未曾出现最大降水量高度。

3. 内华达山地 $39^{\circ}\text{N}$ 西坡和科罗拉多高原南坡的年降水量都是从山麓往上随高度而增加,至1550m附近出现最大降水量,再往上,降水量又随高度减少。

4. 内华达山地 $37^{\circ}\text{N}$ 西坡的年降水量,也是在1550m附近达到最大值,然后往上随高度而减少,可是从2500m往上年降水量又再次增加。如果山地更高,将会在某高度上出现另一个降水量最大值,且其值小于第一最大降水量高度处的降水量。这种最大降水量高度以上降水量随高度再次增加的情况,很可能是地形阶梯的存在,气流经历了上升-下沉-上升两次爬坡运动的结果<sup>[14]</sup>。

年降水量垂直分布存在最大降水量高度,并不意味着各月都存在。例如,内华达山地 $37^{\circ}\text{N}$ 西坡为地中海型气候,最大降水量高度冬春季节位于1550m;秋季升高到2150m;夏季则因气候干燥而未出现最大降水量高度(图2)。内华达山地 $39^{\circ}\text{N}$ 迎风西坡,位于地中海型气

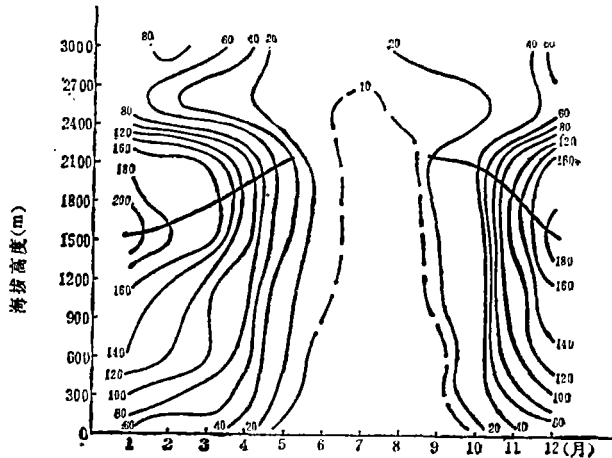


图2 内华达山地 $37^{\circ}\text{N}$ 西坡各月降水量随高度的分布  
Monthly precipitation tistribution with height on  
the western slope ( $37^{\circ}\text{N}$ ) of the sierra Nevada Mt. (mm)

候和温带海洋性气候之间的过渡地带,除盛夏月份,其他各月都在1550m存在着降水量的最大值。科罗拉多高原南坡的气候属于干燥或半干燥气候,夏季各月均未见到最大降水量高度的存在;其他月份的降水量均在1550m达到最大值。

从图1可以看到,年降水量随高度的递增率在不同坡地之间的差异是很大的。事实上,在同一坡地,降水量递增率也随季节而不同。就各坡地最大降水量高度以下各月平均降水量递增率( $\text{mm}/100\text{m}$ )的分布情况来说,其年变程型式大致可以分为两类:一是季节变化幅度很大,冬季大,夏季小(图3<sub>b</sub>);一是月际波动较多,但幅度不大,大致在年平均值上下

摆动(图3<sub>a</sub>)。除了喀斯喀特山地和内华达山地西坡外,其他坡地的平均降水量递增率的季节变化与降水量的季节变化并不存在一一对应的关系。这说明影响平均降水量递增率的季节

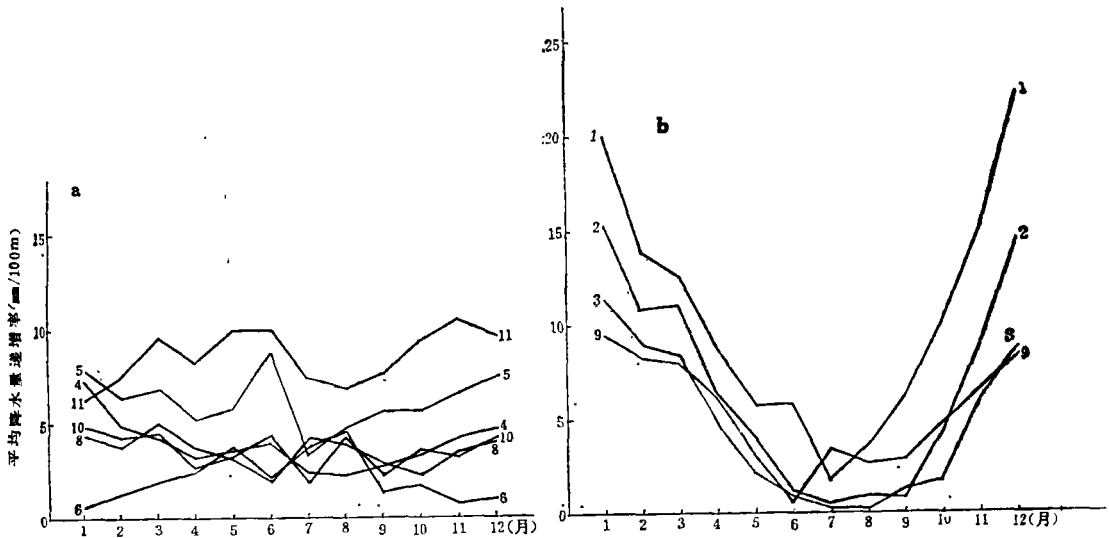


图 3 各坡地平均降水量递增率的季节变化(毫米/100米)

The Seasonal variation of mean rainfall increasing  
rate on the all Slopes (mm/100m)

分布的因子还是比较多的,并不单单是降水量,而且在不同坡地,主要影响因子也有所不同。

降水量随高度的递增率并不是均一的,它既随坡地的地理位置、坡向和海拔高度而变化,又随季节的不同而异。喀斯喀特山地西坡,全年气候温和湿润,各月降水量都是在210m以内的低坡处增加最快,尤其是春秋季节。在坡地上部,冬季的降水量递增率则大于其他季节。内华达山地39°N西坡,只是冬季的降水量递增率在180m内的低坡处达最大值;夏季的降水量递增率很小,大多不到1.6mm/100m。内华达山地37°N西坡,气候冬湿夏干。相应地,冬半年最大降水量递增率出现在130m以下的低坡;夏季降水量递增率很小,且随高度几乎没有什么变化(图4<sub>a</sub>)。落基山地西南坡,各月降水量随高度的增加均在坡地低处最快,最大降水量递增率出现在600—900m。冬季值远大于夏季月份。坡地上部,降水量递增率的季节差异较之低坡要小一些。北部落基山地东坡处于西风气流的背风面,在低坡降水量随高度增加很慢,甚至出现随高度减少的情况。坡地高处的降水量递增率要比低坡处大得多,各月最大降水量递增率都出现在海拔1600m以上的坡地(图4<sub>b</sub>)。南部落基山地东坡属于温带干燥或半干燥气候,从秋季到初春,因海拔很高的山峰附近可以截留更多的来自西风气流中的水汽,所以在这些月份最大降水量递增率位于1850—2750m的高度;夏季随着来自大西洋上暖湿气流影响程度的增加,坡地低处的降水量增加较快,最大降水量递增率出现在高度1300和1850m之间。科罗拉多高原西南坡最大降水量递增率的出现高度随季节而异,多雨季节较低,干旱季节较高。9—2月在1700—2000m,6—8月在2000—2200m,3—5月在

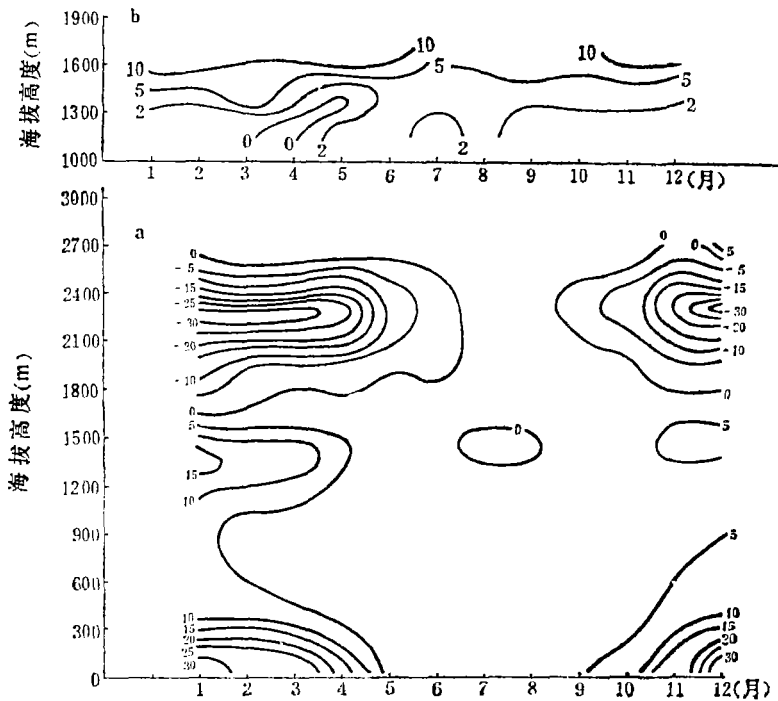


图 4 内华达山地37°N西坡(a)和北部落基山地东坡(b)降水递增率分布  
The distribution of rainfall increasing rate on the western slope (37°N) of the sierra Nevada Mt. and eastern slope of the northern Rocky Mt. (mm/100m)

2700—2900m。科罗拉多高原南坡的最大降水量递增率于6—8月出现在1150—1300m, 其他月份则升高到1300—1550m。阿巴拉契亚山地西坡, 坡地低处的降水量增加最快, 冬夏季的最大降水量递增率出现在180—250m, 春秋季节升至250—350m。该山地东南坡则是在坡地上部降水量增加最快, 各月最大降水量递增率位于600和950m之间。

### 三、山地降水量垂直分布的统计关系

傅抱璞<sup>[9]</sup>根据国内许多山地降水量资料, 发现在最大降水量高度以下, 降水量 $P_z$ 随海拔高度 $Z$ 变化存在着下列实验关系:

$$P_z = P_h + a[(2H - Z)Z - (2H - h)h]$$

式中,  $h$ 和 $P_h$ 分别为山麓的海拔高度(以m为单位)和降水量(以mm为单位);  $d$ 为与地区特点有关的参数;  $H$ 为最大降水量高度。

针对美国各山地上述坡面年降水量的资料, 我们也进行了统计拟合, 发现各坡地年降水量( $P_z$ )和高度( $Z$ )之间也有着类似的实验关系。现分别陈述如下:

#### 1. 喀斯喀特山地西坡

$$P_z = 0.0007(3000 - Z)Z + 736.635, r(\text{相关系数}) = 0.9712$$

## 2. 内华达山地39°N西坡

$$P_z = 0.0004(3200 - Z)Z + 544.669, r = 0.9897$$

## 3. 内华达山地37°N西坡

$$P_z = 0.0003(3200 - Z)Z + 309.233, r = 0.9792$$

## 4. 落基山地西南坡

$$P_z = 0.0005(3200 - Z)Z - 423.757, r = 0.9807$$

## 5. 北部落基山地东坡

$$P_z = 0.0003(5400 - Z)Z - 1083.205, r = 0.9176$$

## 6. 南部落基山地东坡

$$P_z = 0.0001(6000 - Z)Z - 468.280, r = 0.9751$$

## 7. 科罗拉多高原东坡

$$P_z = 0.0003(7000 - Z)Z - 2834.151, r = 0.9993$$

## 8. 科罗拉多高原西南坡

$$P_z = 0.0002(6400 - Z)Z - 1431.225, r = 0.9931$$

## 9. 科罗拉多高原南坡

$$P_z = 0.0005(3800 - Z)Z - 1092.540, r = 0.9180$$

## 10. 阿巴拉契亚山地西坡

$$P_z = 0.0009(1600 - Z)Z + 803.948, r = 0.9489$$

## 11. 阿巴拉契亚山地东南坡

$$P_z = 0.0005(3200 - Z)Z + 935.774, r = 0.9656$$

根据上述实验关系就可以粗略地估计各坡地最大降水量高度以下任意高度的年降水量。

拟合的均方误差大多在30和60mm之间,

从上述各山地多年平均降水量的垂直分布得知, 通常在海拔高于1500m的迎风坡地上才会发现最大降水量高度的存在。我们利用1951—1980年逐年的降水量资料进行分析, 发现如下的事实, 各坡面出现最大降水量的高度各年之间都很稳定, 几乎没有年际变化, 但其年降水量却表现出很大的年际变化。而且发现最大降水量高度和山麓的年降水量之间存在着直线回归关系(表1)。从表1可以看出, 它们的相关系数约大于0.76。其中, 内华达山地37°N西坡这二者的相关系数最大, 达0.83。若将内华达山地的两个西坡的降水量资料序列作为一个统计总体来考虑, 我们发现直线回归方程仍能很好地拟合该总体的情况, 相关系数为0.87。经统计检验证实, 回归效果十分显著。

1. 美国山地降水量的垂直分布是有多种型式的, 它并不总是简单地随高度而增加, 而是和坡地的地理位置、坡向以及季节有着密切的关系。

2. 降水量随高度的递增(减)率不是均一的。通常在西风气流的迎风坡面, 降水量随高度的增加在低坡处最快, 递增(减)率在雨季远大于干季; 在西风气流的背风坡, 于低坡处降水量几乎不随高度而变化, 甚至出现随高度而减少的情况, 最大降水量递增率常出现在坡地上部。

3. 最大降水量高度仅在海拔高于1500米的迎风坡地上观测到, 其高度在雨季较低, 在

表 1 最大降水量高度处年降水量 (Y) 和山麓降水量 (X) 之间的统计关系 (mm)

The Statistical relation between the annual precipitation (Y)  
in maximum precipitation height and precipitation of footfill

地 区	a	b	r	$r_{0.001}$	S	N
(I) 内华达山地37°N西坡	5.2933	80.2208	0.8282	0.4487	8.30	28
(II) 内华达山地39°N西坡	24.5136	54.7268	0.7639	0.4487	10.52	30
(III) 科罗拉多高原南坡	3.6461	50.2691	0.7658	0.4487	6.37	30
(I) + (II)	12.6737	67.8536	0.8675	0.4078	9.78	58

$r$ ——相关系数,  $r_{0.001}$ ——信度  $\alpha = 0.001$  的  $r$  值,  $S$ ——剩余标准偏差,  $N$ ——样本数

于季较高或者不存在。

4. 在内华达山地37°N西坡海拔2500m以上的坡地, 观测到降水量随高度复增的情况。这可能是地形阶梯的存在, 气流经历了上升-下沉-上升两次爬坡运动的结果。

5. 美国各山地坡地年降水量 ( $P$ ) 和高度  $Z$  之间都存在着如下的实验关系:  $P = a(b - Z)Z + C$ 。相关系数都在0.9以上, 拟合均方误差大多为30—60mm。

6. 年最大降水量高度几乎不随年份的不同而改变, 但其年降水量却有着很大的年际变化。而且最大降水量高度和山麓的年降水量之间存在着很好的直线迴归关系, 相关系数很高, 迴归效果十分显著。

感谢: 本文所采用的资料来自美国国家气候资料中心。感谢Frank.T.Quinlan先生和Jim Koss博士阅读本文并提出非常有益的意见。Peter M.Steurer先生编制有关的计算机程序为作者提供了所需要的资料; Mike Burgin先生为本文绘制了图表, 这里一并表示谢意。

### 参 考 文 献

- (1) 李江风, 关于高山降水带的分布, 气象科技资料, 第8期, 1976年。
- (2) 林之光, 地形与降水, 地理知识, 第6期, 1979年。
- (3) 袁育枝, 河北山地降水的垂直分布, 气象, 第10期, 1979年。
- (4) 李江风, 高山降水的廓线特征, 新疆气象, 第3期, 1981年。
- (5) Conference on Sierra Nevada Meteorology, South lake Tahoe, California, June 19—21, 1978。
- (6) Masatoshi M. Yoshino, Climate in a Small area, Tokyo, 1987。
- (7) 傅抱璞, 山地气候, 科学出版社, 1983年。
- (8) Molnár, Katalin, A csapadék magassági rendszere az Északi-Középhegységben Földrajzi, Ertesito, Budapest, 33 (4), 392-399, 1984。
- (9) 施鲁怀, 托木尔峰地区降水的某些特征, 新疆气象, 第2期, 1980年。
- (10) 郭 康, 气流两次爬坡和太行山东坡雨量分布特点, 气象, 第8期, 1981年。
- (11) Reger G. Barry, Mountain weathen and Climate, Methaen & Co. London and New Year 1981。
- (12) 付绍铭、黄大华, 高黎贡山降水分布及其成因分析, 气象, 第3期, 1985年。
- (13) 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 西藏气候, 科学出版社, 1984年。
- (14) 林之光, 关于第二最大降水高度带问题的研究 (二), 贵州气象, 2期, 1987年。

# RESEARCH ON VERTICAL DISTRIBUTION OF MOUNTAIN PRECIPITATION IN THE UNITED STATES

Sun Anjian

(Climatic Data Office, State Meteorological Administration)

**Subject terms:** Mountain precipitation distribution, U.S.A.

## Abstract

In the paper precipitation normal data from 1951 to 1980 in the United States are used to make research on mountain precipitation distribution. According to geographical position and climatic situation, we selected eleven slopes. The western slope of the Cascades Mts., the western slopes (37N and 39N) of the Sierra Nevada Mts., the southwestern and eastern slopes of the Rocky Mts., the southern, southwestern and eastern slopes of the Colorado Plateau as well as the western and southeastern slopes of the Appalachian Mts. The conclusions can be drawn as follows:

1. The mountain precipitation in the United States does not always increase with height simply. Their distribution have four patterns; (1) Precipitation increases with height without or with the maximum precipitation height or with the second maximum precipitation height probably. (2) precipitation decreases with height at first, then it increases with height.

2. The first maximum precipitation height exists mainly on the windward slopes where elevation above sea level is height of more than 1500 meter and its height increases with aridity of climate.

3. On the slope higher than 2500m A.S.L. of the western slope (37N) in the Sierra Nevada Mts. the increase of precipitation with height again is observed. It is a result that airflow climbs up the slope twice experiencing ascending—descending—ascending process.

4. The increasing (lapse) rates of precipitation with height are not uniform and related to geographical position, exposure of the slope and season. Generally the increase of precipitation with height is the fastest at the lower slope on the windward slopes of westerly airflow, and increments or decrements are much larger in rainy season than in dry season, and seasonal differences of the rate values at each height are larger. On the leeward of the westerly airflow the precipitation almost does not change and even decreases with height at the lower slope and the largest increment of precipitation with height often appears at the upper slope or nearby peak and seasonal differences of the rate values at each height are smaller.

5. There are experiment relation between annual precipitation ( $P_z$ ) and elevation above sea level ( $Z$ ) on all the selected slopes of the mountains in the United States as follows:

$$P_z = a (b - z) z + c,$$

where  $a$ ,  $b$  and  $c$  are determinant coefficients and they change with region.

6. Annual maximum precipitation height on the windward slopes almost does not change from year to year, but its annual precipitation has large interannual variation. However, there is a good linear regression correlation between annual precipitation of footfill and maximum precipitation height. The correlation coefficient is very high and regression effect is quite remarkable.