第46卷 第2期 地 理 学 报 Vol. 46, No. 2
1991 年 6 月 ACTA GEOGRAPHICA SINICA June, 1991

# 天山中段及祁连山东段小冰期以来的冰川及环境*

王 宗 太
(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

**提要** 本文通过考察、航片判读、及 AAR 法测算了冰川变化，用地衣、文史资料、及树轮年表进行了小冰期的测年，使用实测资料分析、冰岩芯及树轮资料等估算了小冰期的气温与降水、并进而计算了地表径流的变化。在全部讨论中，还引用了一些试验性的方法和公式。

**关键词** 小冰期 冰川变化 地衣测年 暖干化趋势 零平衡线

"小冰期"概念 (Little Ice Age) 自 1939 年 Matthes 提出后，经过相当时期的争议，目前已被较多的学者认可，并确定是专指发生在人类历史温暖的中世纪之后到二十世纪早期之间，全球性相对寒冷和雪冰覆盖再次相对增大，前后历时约 400—500 年左右的一系列百年尺度气候波动的阶段。

小冰期属于全球现象，包括了一系列的冰川-气候波动，涉及的气温波动约为 2℃ 或更小一些 (Grove, 1988)。其中的公元 1500—1700 年是大多数地区小冰期的主要阶段 (Lamb, 1977)。但是不同地区小冰期的下限并不完全一致，例如，北半球早一些，尤其是北美及北极区约在 15—16 世纪，中国及日本约在 16—17 世纪前后；而南半球稍晚一些，例如智利大约是 18 世纪，而南大洋更是迟至 1900 年前后才出现海冰的最大扩展。

1988 和 1989 年，作者对天山的乌鲁木齐河大西沟、祁连山石羊河的西营河及北大河的某些支流进行了小冰期较系统的野外考察，并使用所得资料，结合前人的有关工作，对其小冰期年代、冰川变化、气候环境及地表径流等问题讨论如下。

## 一、小冰期的年代测定

小冰期的下限大约距今 400—500 年左右，遗留的冰碛物常裸露而少植被，尤其是在西北干燥气候下，冰碛物高离森林线最高可达 1600 m，能适用的测年方法主要为冰岩芯同位素方法、地衣法、树轮法及历史文献分析等。

在天山，采用地衣法对乌鲁木齐河大西沟的有关冰碛进行了测年，使用的地衣为红石黄衣 (*Xanthoria elegans*)。其方法是，首先使用海拔 2130 m 墓地及海拔 3600 m 废弃公

* 国家自然科学基金 9488007 号和中国科学院 87-45-03 号重大项目资助课题。
来稿日期：1989 年 12 月。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

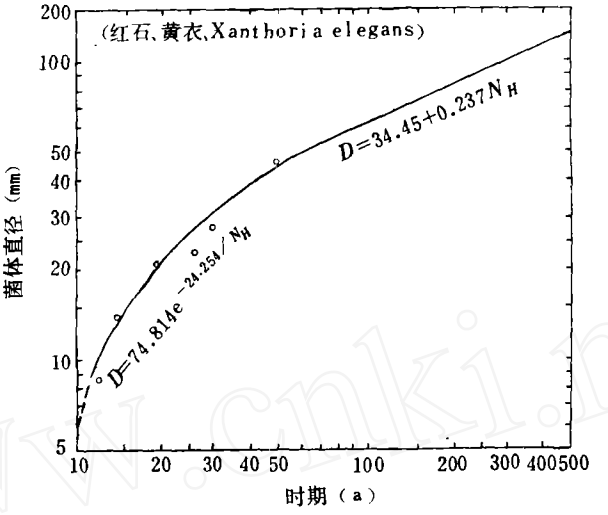


图 1　乌鲁木齐 1 号冰川地衣生长曲线

Fig. 1　The curve of lichen growth on glacier Urumqi R. No. 1.

路的地衣$D$值[最大直径，(mm)]，建立地衣高速生长期的如下回归方程：

$$D = 74814e^{-24.254/N_H} \quad (1)$$

$N_H$——高速生长期年限(年)

利用高速期末$D$值（461 mm）及线性生长期速率（237mm/100 a），绘制该区地衣生长曲线(图 1)，然后从曲线图上量算地衣年令。

总和地衣年令、地衣植入期（27 年)和冰川对气候的滞后期（20 年)获得这里的小冰期有三次冰进，冰进的终结年代分别为公元 1538±20、1777±20 和 1871±20 年。至于 1920 年前后，冰川仅是一次后退中的停顿，看不到前进的迹象。详细计算由另文讨论[1]。

在祁连山区利用文献记载和树轮资料，采用水热条件综合评价的方法来确定小冰期的有关年代。首先从丰富完整的地方志中选用公元 1226 年以来的水旱记载，找出降水相对增多的时段，计有四个，即 1495—1557 年、1652—1772 年、1850—1890 年、和 1919—1939 年。其次，从青海德令哈祁连山园柏（935 年)树轮资料中找出与上述多雨期相当的寒冷期，即 1428—1532 年、1622—1740 年、1797—1865 年、和 1924—1944 年(刘光远，1984)。将上述降水及气温两方面资料共同绘入图 2，可以看到气候变化具有冷湿、冷干、暖湿、暖干四个类型的交替。关于气候波动与冰川进退的关系，应该是复对应而不是单对应，即冰进与冰退分别包括冷湿-冷干、和暖湿-暖干各两个时期。对黄土的分析及其它方面的研究资料，也表明这种复对应关系的存在(周昆叔，1982; Lamb，1977)。

据此认为，图 2 中所显示的 1428—1532 年、1622—1740 年和 1797—1865 年的冷湿-冷干时期，可以和祁连山的三次小冰进相对应。而 1924—1944 年的冷湿-冷干时期，和乌鲁木齐河相似，时间短暂，量级较小，冰川的反应仅是后退中的一次短暂的小停顿。但

1) 王宗太，乌鲁木齐河大西沟小冰期的年代及其冰川变化，1989 年，待发表。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

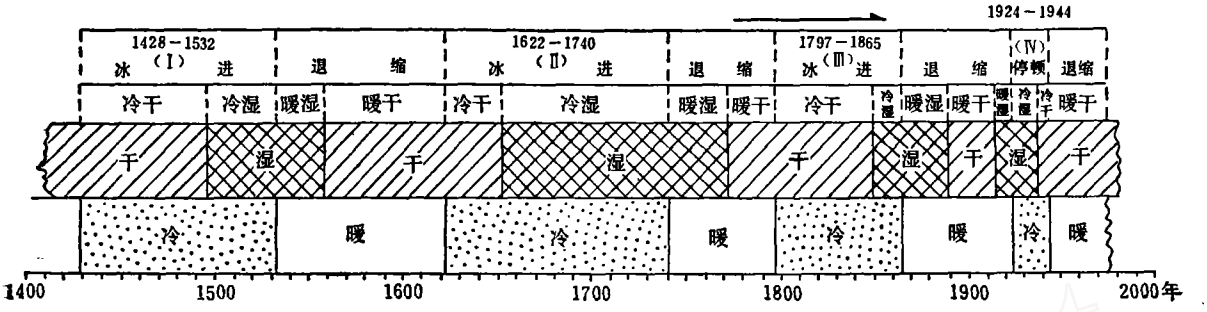


图 2 祁连山区气候变化与冰川进退

Fig. 2 The air variation and glacier fluctuations in Qilian Mts.

是，另有一些学者指出，格陵兰和中国的长江以南（王绍武，1982）、英格兰和威尔士（Lamb, 1977）在 20 世纪前半期属于暖期，和祁连山这一时期的冷湿-冷干正好相反，如何解释这种差异有待进一步研究。

在世界各地由于测年方法及精度不尽相同，对小冰期的年代较难进行精确的对比，但下述差异性比较明显。1）小冰期第一阶段，各地年代差别最大，约达 200 年左右。例如，苏联高加索和天山捷尔斯克伊阿拉套，分别为 13 世纪和 13—14 世纪（Золотарев, 1985; Глазовский, 1988），瑞典和东阿尔卑斯为 1590—1620 年和 1599—1601 年（Grove, 1988），中国东部为 1454—1570 年（竺可桢，1979），祁连山石羊河为 1428—1532 年。而后来的几次冰进（或停顿）年代差值大为减小，只有 15—80 年左右。2）在相对较冷或较湿的地区，小冰期的开始年代稍早一些。其原因可能是那里相对更接近小冰期水热条件的临界点，能较快地完成冰进的物质积累。例如，瑞典稍早于阿尔卑斯，高加索稍早于天山，祁连山中东段稍早于天山乌鲁木齐河，等等。

## 二、小冰期以来的冰川变化

小冰期以来的冰川变化，包括冰川条数、面积、储量、和零平衡线高程等的变化。其面积变化的测算，是通过重点冰川的考察与普遍的航片判读进行冰川目录编纂，而后量算统计。其零平衡线，是在大比例尺地形图上采用 AAR 法（积累区比率）测算，而后再用侧碛初现高程及冰川中值高程验证确定。所得数据列入表 1—3。

分析表 1—3 看出，中国西北的冰川作用自小冰期以来虽有几次小的冰进穿插，但总的趋势是不断的退缩（表 1、2）。从遗留的终碛垅来看，第一道终碛的范围大，而第二道的体形高。例如乌鲁木齐 1 号冰川，第二道终碛的范围比第一道小 2.7%（表 2），但其相对高度却高出 5 m；水管河 4 号冰川的上述数据分别为 7.8% 和 3 m。从而表明，这两次冰进时的气候冷湿程度比较接近。从地区分布来看，退缩量最大的是南亚季风波及的地区，例如冷龙岭，小冰期以来的冰川面积已减小了 46.1%，零平衡线升高 140 m；其次为西风带的天山（大西沟），冰川面积减少 43.9%，零平衡线升高 134 m，苏联中央高加索南坡冰川面积减少 41.2%。最小的是极大陆性寒漠气候下的羌塘高原北部，包括祁连山西段和阿

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　小冰期以来的冰川面积变化

Tab. 1　The variation of glacier area since Little Ice Age.

| 年　代 | 减　少　面　积 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 水管河 4 号冰川 | | | “七一”冰川 | | |
| | $-km^2/a$ | 积累减少比例 (%) | 零平衡线 (m) | $-km^2/a$ | 积累减少比例 (%) | 零平衡线 (m) |
| 1507 | | | 4360 | | | 4590 |
| 1762 | 0.00063 | 7.8 | | 0.00019 | 1.5 | |
| 1857 | 0.00187 | 16.4 | 4410 | 0.00068 | 3.6 | |
| 1956 | 0.00199 | 26.0 | | 0.00229 | 10.7 | |
| 1963 | 0.00671 | 28.3 | | | | |
| 1976 | 0.00715 | 32.8 | 4500 | 0.00175 | 11.8 | 4650 |
| 1989 | 0.00608 | 36.7 | | 0.00046 | 12.0 | |
| 总计平均 | 0.00156 | 36.7 | (升高) 140 | 0.00079 | 12.0 | (升高) 60 |

表 2　乌鲁木齐 1 号冰川小冰期以来的面积变化

Tab. 2　The area variation of glacier Urumqi R. No. 1 since Little Ice Age.

| 年代(公元) | 减　少　面　积 | | | 备　注 |
|---|---|---|---|---|
| | $-km^2/a$ | 积累面积比例 (%) | 零平衡线 (m) | |
| 1538 | | | 3920 | 面积据 1982 年 1/5000 地形图量算。 |
| 1777 | 0.0003 | 2.7 | | |
| 1871 | 0.0015 | 9.2 | 3945 | |
| 1920 | 0.0009 | 11.2 | 3970 | |
| 1964 | 0.0009 | 13.0 | 4047 | |
| 1973 | 0.0076 | 16.0 | 4062 | |
| 1980 | 0.0020 | | | |
| 1988 | 0.0038 | 18.0 | 4059 | |
| 总计、平均 | 0.0009 | 18.0 | (升高) 134 | |

表 3　小冰期以来的冰川变化

Tab. 3　The glacier variation since Little Ice Age.

| 山区、流域 | 条数减少(%) | 面积减少(%) | 储量减少(%) | 零平衡线升高 (m) | 备　注 |
|---|---|---|---|---|---|
| 天山大西沟 | 13.3 | 43.9 | 56.3 | 134 | 至1964年 |
| 祁连山冷龙岭 | 39.9 | 46.1 | 50.2 | 140 | 至1956年 |
| 祁连山柳沟泉河 | 9.3 | 21.5 | 31.0 | 60 | 至1956年 |
| 中央高加索南坡[1] | | 41.2 | | | 至1979年 |

1) Голодковская, 1982.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

尔金山南坡。例如"七一"冰川所在地柳沟泉河流域,冰川面积只减少 21.5%,零平衡线只升高约 60 m。航片判读还能看到阿尔金山南坡的冰川前端小冰期冰碛极不显著,可可西里山一带的小冰期冰碛长度也只有 200—300 m,远小于天山和祁连山的 400—600 m。从时间上看,第三次冰进(19 世纪)以来的 100 多年是小冰期中退缩强烈的阶段,这期间冰川面积减少量是以前的 0.9—2.3 倍(表 1.2)。尤其是本世纪的六十年代到七十年代初,平均每年冰川面积减少量居小冰期以来之首(表 1.2)。

## 三、小冰期的气候环境与地表径流

### (一) 小冰期的气温

借用现代山区树轮宽度与气温的相关经验公式,推算古代树轮变化所反应的气温。

在天山(大西沟)使用的是 1983 年大西沟海拔 2900 m 处采得的 375 盘树轮(康兴成,1985)。其 1959—1983 年的树轮宽度 (W) 同天山云雾站 (3539 m) 同期的 10—4 月平均气温 ($T_{10-4}$) 有如下相关方程:

$$T_{10-4} = -9.4378 - 0.019W \quad (2)$$

同理,祁连山青海德令哈海拔 3750 m 的 935 年树轮(刘光远,1984),树轮指数 ($W_I$) 与海拔 2707 m 的门源县 1957—1977 年的 6—8 月气温 ($T_{6-8}$) 又有如下相关方程:

$$T_{6-8} = 9.7 + 0.00079W_I \quad (3)$$

天山树轮采自较低海拔,相对气温较高,在较高气温环境生长的树轮对冬季低温敏感。相反,祁连山的树轮生长在较高海拔的较低温环境下,将对夏季高温敏感。这可能是上述树轮表现出对冬季或夏季气温选择相关的原因。

用上述公式,分别对相应于小冰期时的树轮推算出冬季和夏季平均气温,并再使用冬季或夏季气温同年温的相关性推算出年温。所得数据为,天山(大西沟)小冰期时年温比今降低 1.3℃,夏季降低 0.6℃,祁连山则分别为 1℃ 和 0.67℃。上述降温值稍小于中国东部的 1.5℃ (王绍武,1982),但却稍大于英格兰的 0.7℃ (Lamb, 1977),和欧洲的夏季降温值 0.5℃ (Schurman, 1981)。

### (二) 小冰期降水量

冰川学研究已发现,零平衡线高程与气温及降水量相关,并推导出一些零平衡线方程,用于计算冰川的消融量及降水量。本文根据天山站 28 年来的有关资料,导出大西沟的零平衡线方程如下:

$$H_0 = 4349.8 + 105.9T_{5-9} - 1.29P_B \quad (4)$$

$H_0$——零平衡线高程 (m)

$T_{5-9}$——5-9 月平均气温 (℃)

$P_B$——平衡年降水量 (mm)

将有关数据代入 (4) 式,获得大西沟海拔 3539 m 一带小冰期平衡年降水量为 473—489 mm,比今约增加 50—65 mm。

在祁连山地区,已对敦德冰川 139 m 深的冰岩芯进行了微粒含量研究和分层定年,并

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

推算了其中近 300 年来的各年的净积累量[1]。

对上述数据进行积累率校正后，获得海拔 5300—5000m 一带现今平衡年平均降水量为 503 mm 左右，小冰期时为 581 mm 左右，比今多 78 mm 左右(约为 70—85 mm)。

天山和祁连山小冰期降水量及气温情况列入表 4。

表 4　小冰期以来的气温和降水

Tab. 4　The air temperature and precipitation since Little Ice Age.

| 时代 | 地区 | 高程 (m) | 年均温(℃) | 夏均温(℃) | 年降水量(mm) | 备　注 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 小冰期 | 天山(大西沟) | 3539 | −6.8——6.5 | 1.7—1.9 | 474—489* | * 加上30.9%的误差修正后分别为620—640和556.9 |
| | 祁连山(门源) | 2707 | 约−0.65 | 约10.02 | | |
| | 祁连山(敦德冰川) | 5324 | | | 约 581 | |
| 二十世纪60—80年代 | 天山(大西沟) | 3539 | −5.35 | 2.37 | 425.1* | |
| | 祁连山(门源) | 2707 | 0.35 | 10.69 | | |
| | 祁连山(敦德冰川) | 5324 | | | 约 503 | |

根据气温和降水的推算，并结合冰川面积变化分析，可以推知小冰期以来的气候变化，是在几次波动中逐渐趋于暖干。而且变化的周期逐渐缩短。例如天山大西沟第一、二次冰进之间间隔 239 年，二、三次之间为 94 年，至三、四之间已只有 29—79 年。祁连山一带则分别为 200 年、150 年和近于 100 年左右。

### (三) 小冰期的地表径流

天山和祁连山的大部分河流，例如大西沟和西营河等，都是由降水、冰水及雪水以不同比例组成的山区河流，具有河谷窄、两岸陡、坡降大及径流输送快等特征。这种河流的径流量 ($Q$) 构成较简单，可概括为下式：

$$Q = Q_P + Q_I + Q_g \tag{5}$$

$Q_P$——大气降水径流，包括季节雪融水，

$Q_I$——冰川融水径流，

$Q_g$——地下水(基流)，对于距今时间不太长的小冰期来说，可视为稳定不变。

上式中的各项，均指的是山口站测到的实有流量，已消除了蒸发和其它损耗的影响，故而没有蒸发损耗项。就 (5) 式来看，只要计算出 $Q_P$ 及 $Q_I$，就能推算出小冰期山区冰水河的地表径流。对博格达南坡晚更新世冰水河径流的估算，已证明了这种方法有一定的可行性(王宗太，1989)。

各地河流 $Q_P$ 同平衡年降水量都有相应的相关方程，天山大西沟为：

$$Q_P = 0.3688 + 0.00314P_B \tag{6}$$

祁连山西营河的相关方程则为：

$$Q_P = 0.8823 + 0.0048P_B \tag{7}$$

$Q_I$ 的推算用冰川径流模数法。首先需将现在的冰川径流模数 ($M_g$) 订正到小冰期 (Mg′)，订正公式为：

1) 杨钦钊，祁连山敦德冰川冰岩中微粒分析及其应用，1989 年。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 5 小冰期以来的地表径流变化

Tab. 5 The runoff variation since Little Ice Age.

| 地区 | 时代 | $Q$ ($10^8m^3$) | $Q_p$ | | $Q_l$ | | $Q_g$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ($10^8m^3$) | 占 Q (%) | ($10^8m^3$) | 占 Q(%) | ($10^8m^3$) | 占 Q(%) |
| 天山大西沟 | 小冰期 | 2.6498 | 1.8790 | 70.9 | 0.2947 | 11.1 | 0.4761 | 18.0 |
| | 20世纪80年代 | 2.2780 | 1.6106 | 70.7 | 0.1913 | 8.4 | 0.4761 | 20.9 |
| | 增减(%) | −14.0 | −14.3 | −0.2 | −35.1 | −2.7 | 0.0 | 3.0 |
| 祁连山西营河 | 小冰期 | 3.724 | 2.840 | 76.3 | 0.200 | 5.4 | 0.684 | 18.3 |
| | 二十世纪80年代 | 3.180 | 2.388 | 75.1 | 0.108 | 3.4 | 0.684 | 21.5 |
| | 增减(%) | −14.6 | −16.3 | −1.2 | 46.0 | −2.0 | 0.0 | 3.2 |

$$M_g' = K_a(M_g + \Delta T \cdot r_L) \tag{8}$$

Mg: 使用现冰川面积与冰融水量求得，大西沟为 40.45 (L/s · km²)，西营河为 45.9 (L/s · km²)

$\Delta T$: 小冰期与现在的夏季温差，大西沟为 0.6℃，西营河为 0.67℃。

$r_L$: 气温变化 1℃ 时 Mg 增减量，采用 5 (L/s · km² · ℃)

Ka: 消融区比率修正系数，即现在的比率对小冰期的比值，大西沟为 0.45/0.51 = 0.88，西营河为 0.45/0.55 = 0.82。

用 6—8 式，对大西沟和西营河进行小冰期地表径流量计算，所得数据列入表 5。可以看出，小冰期以来，地表径流普遍处于减少状态。其中大西沟(天山)减少 14%，西营河(祁连山)减少 14.6%，两地相差不太大。两地降水径流减少分别为 14.3% 和 16.3%，后者稍大于前者。但是两地的冰水径流的减少相差悬殊，分别为 35.1% 和 46%，显然是受冷龙岭冰川面积大量减少 (46.1%) 的影响。地表径流的这种减少趋势，无疑是与小冰期以来的气候逐渐暖干化，以及冰川面积不断减小有关。今后若气候变化没有显著的逆转，则地表径流减少的势态亦将不会改变，并将随冰川的大量消失而有所加强。

## 四、结 论

1. 天山中段和祁连山东段，自小冰期以来普遍地有过三次较大的气候波动。其年代大约分别在 15 世纪末—16 世纪初、17 世纪中—18 世纪末、及 19 世纪中后期，相应地出现三次明显的冰进。从地区来看，较冷湿地区的小冰期似乎具有先开始的迹象。

2. 冰川面积减少随地区而异。其中，减少量最大的是南亚季风波及的冷龙岭，冰川面积减少 46.1%，零平衡线升高 140 m；其次为西风带的天山大西沟，分别为 43.9% 和 134

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

m；最小的是祁连山西段的柳沟泉河，分别为21.5%和60 m。

3. 小冰期以来，冰川面积的减少具有随时间增强的趋势，尤其是19世纪以来的100多年冰川退缩更为强烈。

4. 小冰期中的冰进时期，显示出冷湿气候特征。至今年温已升高1—1.3℃，夏季升高0.6—0.67℃，降水量减少50—78 mm。暖干化趋势较为明显。

5. 小冰期以来的地表径流减少14—14.6%，其中尤以冰水径流减少的比例最大，达35—46%。从地区分布来看，祁连山东段地表径流减少比例最大。据此类推，冰水补给比例大的河流，其径流量的减少可能还要更大一些。

6. 利用冰川变化来研究气候波动，尤其在仍保留着新鲜完整遗迹的近500年来的小冰期时段中，是可取的方法之一。但是这方面系统的和全面的考察才刚开始，对于全面系统的认识中国西部的小冰期，尚有待进一步的资料积累。

## 参　考　文　献


[1] 王绍武、近代气候变化的研究，纪念科学家竺可桢文集，科学出版社，1982，159—182。

[2] 王宗太，1989，博格达峰区南坡晚更新世晚期冰水河的出山地表径流估算，干旱区资源与环境，3 (2)，34—45。

[3] 刘光远、王玉玺、张先恭、季存法，1984，祁连山近千年的年轮气候及其在冰川上的反映，中国科学院兰州冰川冻土所集刊，第5号，科学出版社，97—108。

[4] 竺可桢，中国近五千年来的气候变迁的初步研究，竺可桢文集，科学出版社，1979，475—497。

[5] 周昆叔、梁秀龙、刘瑞玲，初论我国黄土的古气候，第三届全国第四纪学术会议论文集，科学出版社，1982，134—137。

[6] 康兴成，(1985) 天山乌鲁木齐河流域年轮气候的初步分析，冰川冻土，7(2)，133—139。

[7] Jean M.Grove, The Little Ice Age, London and New York, Methuen, 1—165, 1988, 210—261.

[8] Lamb, H. H., Climate, Present, past and Future, (Climatic history and the future) Methuen & Co, London, 2 (1977), 328—675.

[9] Matthes F. E., "Repot of Committee on Glaciers, April 1939", Transactions of the American Geophysical Union 20, 1938 518—523.

[10] Schurman, C.J.E., Climate of last 1000 years, Climate Variations and Varibility, Facts and Theories, D.Reidel Publishing Company, 1981.

[11] Голодковская, Н.А., динамика ледников южного склона Центральнэго Кавказа за последние 700 лет по лихенометрический данным, МГИ, вып. 45, 1982, 76—84.

[12] Глазовский, А. Ф., Соломина, О. Н., динамика ледников северногосклона хребта Терскей Ала-Тоо по лихенометрическим данным, МГИ, вып. 62, 1988, 113—119.

[13] Золотарев, Е. А., Сейнова, И. Б., Изменение ледников бассейна р. Баксан в последние столетия, МГИ, вып. 53, 1985, 192—196.


*　　*　　*　　*

**作者简介**　王宗太，男，1934年11月生，副研究员。1957年毕业于北京大生地质地理系。现主要从事普通冰川、冰川资源及冰川地貌研究，曾发表"祁连山区现代冰川发育条件、分布特征及区划"等论文。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

# THE GLACIER AND ENVIRONMENT IN THE MIDDLE SECTOR OF TIANSHAN AND THE EASTERN SECTOR OF QILIANSHAN SINCE THE LITTLE ICE AGE

Wang Zongtai

*(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences)*

**Key words** Little Ice Age; Glacial variation; Age determination of licher; Dry-warming trends; E.L.A.

## Abstract

The climation Variation is obviously in dry-warming trends since little Ice Age in the middle sector of Tianshan and the eastern sector of Qilianshan. Up to now, annual air temperature has risen about 1—1.3°C, summer air temperature has risen 0.6—0.67°C , precipitation has reduced 50—78mm, glacial area has reduced about 21.5—46.1%, runoff has reduced about 14%. Among them, the glacial variation in eastern sector of Qilianshan is the biggest, in western sector of Qilianshan is the least, in middle sector of Tianshan is medium.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net