

乌鲁木齐河源雪密度观测研究*

杨大庆 张寅生 张志忠
(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

摘要 乌鲁木齐河源高山区积雪形成期(10月)积雪层的月平均密度为 $140\text{kg}/\text{m}^3$,稳定积雪前期(11—2月)和稳定积雪后期(3—4月)雪层的月平均密度分别为 $190\text{—}210\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $175\text{kg}/\text{m}^3$,非稳定积雪期(5—9月)的新雪密度介于 $90\text{—}125\text{kg}/\text{m}^3$,平均值为 $112\text{kg}/\text{m}^3$ 。统计分析表明,冬季积雪层的平均密度不随积雪深度而变化,但与5日平均气温和5日合计降水量呈反相关关系,夏季新雪的密度随雪深的增大而上升,风速对冬季积雪层平均密度和夏季新雪密度均无明显影响作用。

关键词 高山区 积雪层 新雪 密度

雪密度是单位体积积雪的重量(kg/m^3),其与雪深(m)的乘积为雪压(单位面积上雪的重量, kg/m^2)。水的容重是 $10^3\text{kg}/\text{m}^3$,因此雪压可以换算成为水层深度(mm),即雪水当量。雪密度这一基本物理参量对积雪区域水量平衡研究、融雪径流模拟、雪崩预报和建筑物雪荷载计算均有重要意义。目前较常用的测量雪密度的方法有称重^[1,2]和融化雪水量测体积^[2]两种。位于乌鲁木齐河源高山区的大西沟气象站($43^{\circ}06'N$, $86^{\circ}50'E$; 3540m)采用国产称雪器^[2]测量雪压并同时测量雪深。为了修正降水量测量系统误差,我们曾经在本区用测雪板测量夏季降雪量^[3-5],1989年冬季开展高山积雪物理性质及其水文作用的观测研究。基于上述资料,本文研究高山区积雪层的平均密度及其与气象要素的关系,以及雪层密度剖面。

一、雪层平均密度的时间变化过程

根据地面气象观测规范,当台站四周视野地面被雪覆盖超过一半时要观测雪深(cm),当地面雪深达到或超过5cm时每隔5日观测雪压。在1984年1月到1989年12月间,大西沟气象站共观测雪深及雪压197次,依此可以计算各月雪层的平均密度及其标准差(图1)。图1表明,雪深和雪层平均密度的年变程可以划分为不同的四个阶段:

(一) 积雪形成期(10月)

随着月平均气温由正转负,固态降水比重增加,地面积雪形成,深度逐渐增加至13cm,雪密度由 $90\text{kg}/\text{m}^3$ 同步增大到 $140\text{kg}/\text{m}^3$,表明积雪逐渐密实化。

(二) 稳定积雪前期(11—2月)

月平均气温介于 $-10\text{—}-16^{\circ}\text{C}$,降雪量稀少,积雪深度维持在15—18cm,雪层密度介

* 国家自然科学基金资助项目。
来稿日期:1990年4月。

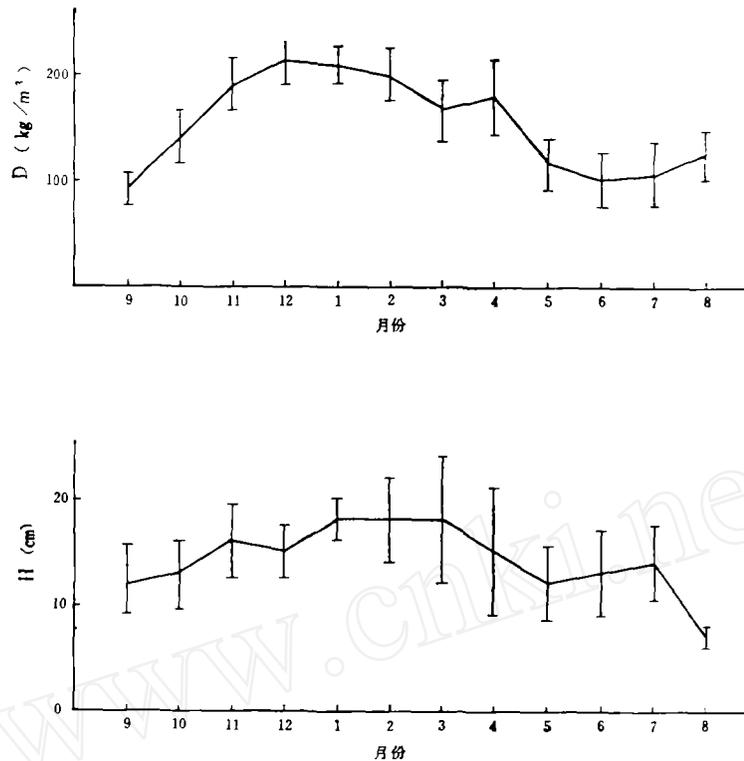


图1 雪密度(D)、雪深(H)及其标准差的年变程

Fig. 1 Monthly change of the snow density (D), snow depth (H) and their standard deviation

于 $100\text{--}280\text{kg/m}^3$, 各月平均密度在 $190\text{--}210\text{kg/m}^3$ 之间变化, 为全年最高值, 表明因重力作用而产生的密实化业已基本完成。

(三) 稳定积雪后期(3—4月)

月平均气温由 -12°C 回升到 -6°C , 4月中下旬中午的气温高于 0°C , 积雪表面的升华和融化致使雪层减薄, 融水下渗作用导致底层积雪密度加大。另一方面, 降水量的增加致使积雪层中低密度新雪所占的比重上升。上述两因素的综合作用致使积雪深度略为下降, 积雪层平均密度同步降低至 175kg/m^3 左右。

(四) 非稳定积雪期(5—9月)

各月平均气温均高于 0°C , 在低温大降水天气条件下, 形成非稳定积雪, 其维持时间取决于气温状况。气温高时, 积雪融化迅速, 数日内消失。因此, 在非稳定积雪期内, 雪深随时间的变化曲线常有零值。除长期低温降水天气条件之外, 图1所示5—9月各月平均雪深通常为当月几次大降雪的平均厚度, 并不表明有连续稳定的积雪存在。非稳定积雪雪层均一, 密度介于 $90\text{--}140\text{kg/m}^3$, 平均值为 112kg/m^3 , 是全年中的最低值。

雪深和密度观测系列的标准差, 从10月积雪形成期间1月稳定积雪期减小, 以后增大, 到稳定积雪后期末的4月达到最大值, 非稳定积雪期的标准差仅次于4月, 月际变化不大。原因是稳定积雪前期及后期(除4月下旬之外)降水量稀少, 雪深变化幅度很小, 春

季降水量增多,雪层中新雪和陈雪的比例变化剧烈,而夏季的新雪几乎无层间的差异。值得注意的是,雪深的变差系数(标准差与均值之比)比密度的变差系数大一倍,表明前者在时间上相对于后者是相当易变的参数。

图2为1987年9月至1988年8月雪层平均密度、雪深、降水量及5日平均气温随时间的变化过程。由图可见:(1)地面积雪在5日平均气温为 -1°C 的10月中旬出现,11—1月积雪深度约为20cm,2—3月增大到30cm,4月中旬达到40cm,月底迅速融化,对应的气温为 3°C 。5—9月的非稳定积雪由低温条件下的大降水造成,5月非稳定积雪维持时间较长,融化过程缓慢,其他月份在1—5天内便消失逸尽。(2)冬季稳定积雪层的平均密度介于 $121\text{—}245\text{kg}/\text{m}^3$,各月的平均值为 $147\text{—}219\text{kg}/\text{m}^3$,与多年平均值($190\text{—}210\text{kg}/\text{m}^3$)相比,稳定积雪前期密度较低,其他时段差别不大。冬季降水对雪层平均密度有重要影响,在积雪深度为10—20cm时,如若日降水量超过1.5mm,雪层平均密度通常由 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 下降到 $150\text{kg}/\text{m}^3$ 左右。降水出现的次日积雪深度变薄的速率一般不超过 $5\text{cm}/\text{d}$,

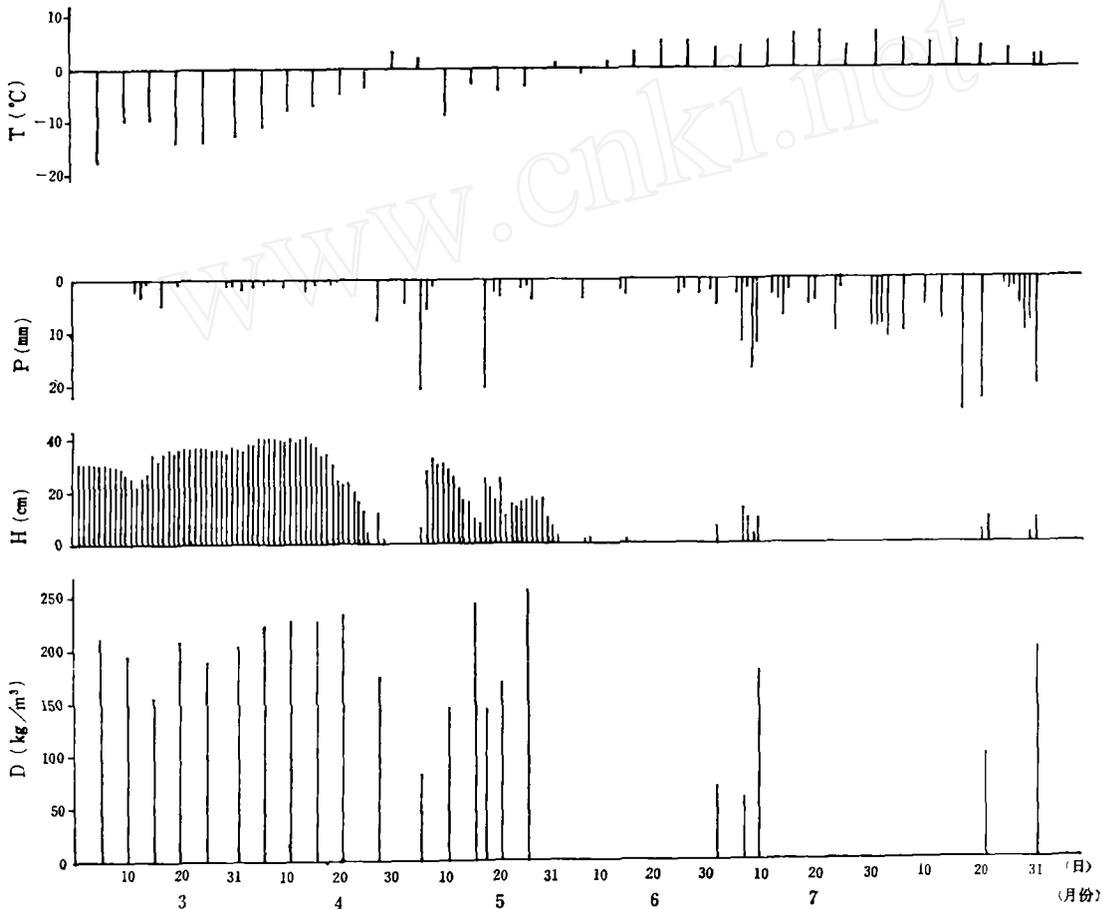


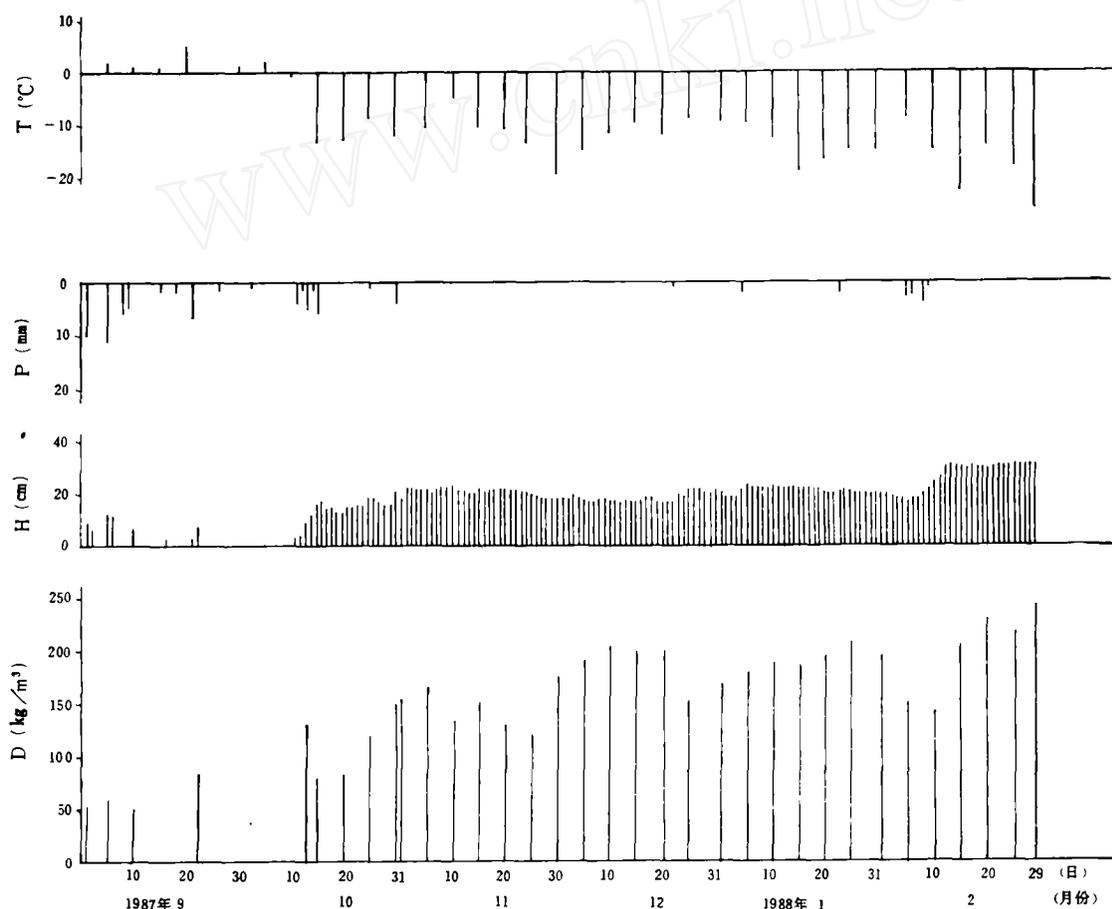
图2 雪深(H)、雪密度(D)的年内时间变化

Fig. 2 Temporal change of the snow depth (H), snow density (D), the

相应的密度增加率约为 5%, 例如 1987 年 10 月 30 日至 31 日。连续数日无降水, 积雪深度和密度的变化均很小, 表明因重力作用而产生的积雪密实化是比较缓慢的过程。(3) 在非稳定积雪期的 5—9 月, 降水停止后气温回升, 地面积雪融化, 厚度迅速减薄, 融水向雪层下部渗透, 致使雪层平均密度明显增大。例如 5 月 10—15 日和 20—25 日的增加率分别高达 66% 和 50%, 这种快速密实化过程与冬季积雪在自身压力作用下的缓慢密实化过程形成鲜明的对比, 其中气温是主要的制约因素。(4) 稳定积雪期气温较低, 积雪深度与气温基本无关。雪深与雪层平均密度的关系从图中难以确定。

二、雪层平均密度与雪深、气温、降水量和风速的关系

统计分析表明, 稳定积雪期雪层的平均密度与积雪深度不相关, 证实积雪的密度不随雪深而变化^[1]。然而, 雪层平均密度 (D) 与包含观测日在内的前 5 日平均气温 (T_5) 和降水量合计数 (P_5) 呈显著的反相关关系((1)式、(2)式)。因为在低温天气条件下, 大



及相应的 5 日平均气温 (T) 和日降水量 (P)

corresponding 5-day averaged air temperature (T) and daily precipitation (P)

气降雪晶体的平均尺寸比温暖天气条件下的小,而降雪致使雪层中低密度新雪的比重上升。

$$D = -2.7T_s + 158.5, \quad -25.7 \leq T_s \leq -2.1 \quad (1)$$

$$(N = 122, R = -0.27, \alpha = 0.01)$$

$$D = -10.7P_s + 207.1, \quad 0 \leq P_s \leq 9.3 \quad (2)$$

$$(N = 122, R = -0.43, \alpha = 0.01)$$

式中: N 和 R 分别代表样本数和相关系数, α 为置信水平。

非稳定积雪期雪层的平均密度(通常为新雪的密度)与雪深呈正相关,这一结论与 Meister^[6] 的计算结果一致。另外,与稳定积雪期相类似,新雪的密度与降水日气温有反相关关系,即降水日气温愈低,则新雪密度愈大。Meister^[6] 指出,当日平均风速低于 5m/s 时,新雪密度与降水日平均风速无关。然而,在日平均风速超过 10m/s 的山区某台站(海拔 2540m),新雪密度与日平均风速呈微弱正相关。本文的计算表明,在乌鲁木齐河源比较开阔的平坦地区,风速对新雪和稳定积雪层的平均密度无明显影响。主要原因是年降水量的 88% 在日平均风速低于 3m/s 的条件下发生^[7], 参加计算的日平均风速介于 0—5.3m/s, 75 日的平均值为 2.2m/s。如此的低风速,不足以导致雪花因频繁碰撞失去枝杈而明显圆化,从而较紧密地堆积于地面,形成密度较大的积雪层。另外,在冬季稳定积雪期,积雪表层通常为密度和硬度均较大的风板(wind crust),其厚度仅为 1—3cm,因此对 10—40cm 积雪层的平均密度无显著的改变。

三、雪层密度剖面举例

由于观测仪器和方法的限制,以上将雪层视为整体对待,研究积雪层的平均密度。实

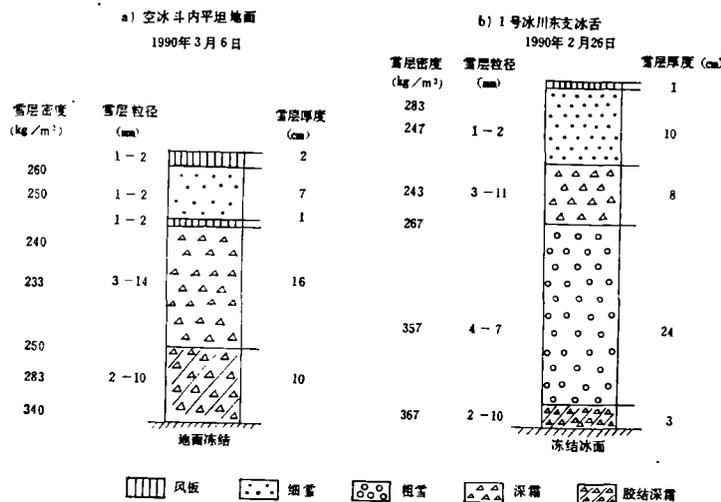


图3 雪层密度剖面

Fig. 3 Profile of snow density (kg/m³)

际上,冬季稳定积雪具有相当明显的层状结构(层状差异),这是其区别于非稳定积雪和新雪的主要特征之一。

乌鲁木齐河源冬季积雪的分布很不均匀,由于吹雪、雪面升华和差异融化,迎风的向阳坡几乎无积雪,平地、背风的阴坡或洼地的雪深介于 10—60cm,最大雪深一般不超过 1.5m,属浅积雪区。空冰斗和 1 号冰川东支冰舌的雪坑资料表明,冬季稳定积雪中期的雪层由风板、细雪、粗深霜 (coarse depth hoar) 和胶结深霜 (sintering depth hoar) 四部分组成,各层位的密度差异相当明显,沿雪深分布的基本规律为表面和底层密度大,中部密度小(图 3)。原因是风吹雪沉积和风压作用于积雪表层形成细雪构成的硬壳(风板),底层雪体在上覆积雪压力和地面热力传导作用下的变质过程比较迅速,从而首先密实化。

据雪坑资料计算空冰斗和 1 号冰川东支冰舌雪层的平均密度分别为 $256\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $308\text{kg}/\text{m}^3$,后者超过大西沟气象站冬季实测雪层平均密度的最大值 $280\text{kg}/\text{m}^3$,主要原因是冻结冰面向上覆积雪层中传递的热流很小,雪层底部深霜发育不良,高密度的粗雪厚度较大,占积雪总厚度的 52%。

四、结论和讨论

据大西沟气象站观测记录,乌鲁木齐河源高山区 5—9 月的新雪密度介于 $90—125\text{kg}/\text{m}^3$,平均值为 $112\text{kg}/\text{m}^3$ 。稳定积雪形成期(10 月)雪层的月平均密度为 $140\text{kg}/\text{m}^3$,稳定积雪前期(11—2 月)和后期(3—4 月)各月雪层的平均密度分别为 $190—210\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $175\text{kg}/\text{m}^3$ 。统计分析表明,冬季积雪层的平均密度不随雪深而变化,但是与 5 日平均气温及 5 日降水量合计呈反相关关系。新雪的密度随雪深的增大而上升,风速无论对积雪层的平均密度和新雪密度,均无明显的影响作用。本区积雪的密实化可区分为冬季重力作用为主的缓慢过程和春季气温制约下的具有融雪水下渗参与的快速过程两种类型。

采用称重法量测雪密度的精度主要取决于取样和称重的准确性。Goodison^[8] 发现国外 6 种通用的取样器(称雪器)测量的积雪密度比实际值偏高 0.3—10.3%,原因是圆桶形取样器将四周的积雪挤压进入其中,致使取得雪样的体积大于取样器的体积。研究区域的野外观测实践表明,夏季高山降雪多为湿雪,雪花相互粘连,降落至地面后开始微弱融化,含水量比较高,给密度和雪深的准确测量带来困难。大西沟气象站湿雪密度的测量资料较少,其中 6 月和 7 月曾经有 $29\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $18\text{kg}/\text{m}^3$ 的观测记录。据 Paterson^[9],新降湿雪的密度通常为 $100—200\text{kg}/\text{m}^3$,而新降干雪的平均密度是 $100\text{kg}/\text{m}^3$ ^[10-12]。1987 年和 1988 年夏季,我们用日本产的 100cm^3 称雪器在本区观测的新雪密度介于 $60—260\text{kg}/\text{m}^3$,42 次测量的平均值为 $145\text{kg}/\text{m}^3$ 。因此,大西沟气象站夏季观测雪密度的平均值($112\text{kg}/\text{m}^3$)也许比实际值略为偏低。冬季积雪密度测量的次数多,精度亦比夏季高。所以本文根据实测积雪密度资料得到的主要结论是基本可靠的。遗憾的是,关于国产称雪器和体积量雪器的精度评价及其测值之间的可比性问题未见报道。因此,我们已经开始并将继续雪密度对比量测的实验研究,旨在确定各种测量方法和仪器的系统误差的符号和量级,寻找修正误差的有效途径。

参 考 文 献

- [1] Goodison, B. E. et al., Handbook of snow, Pergamon Press Canada Ltd., Sept. 1981, 220—232.
- [2] 中央气象局,地面气象观测规范,气象出版社,1979年12月,68—70。
- [3] 杨大庆,普通雨量器湿润损失实验的初步分析,气象,14(10),1988,51—53。
- [4] 杨大庆等,天山乌鲁木齐河源夏季降水观测系统误差分析及其修正,冰川冻土,4(10),1988,384—399。
- [5] Yang Daqing et al., Research on analysis and correction of systematic errors in precipitation measurement in Wulumqi river basin, Tianshan, Proc. International Workshop on Precipitation Measurements, St. Moritz, Switzerland, 1989, 173—179.
- [6] Meister, R., Density of new snow and its dependence on air temperature and wind speed, Proc. International Workshop on the Correction of Precipitation Measurements, Zurich, Switzerland, 1985, 73—80.
- [7] 杨大庆等,乌鲁木齐河源高山区固态降水对比量测的主要结果,科学通报,13(22),1990,1738—1741。
- [8] Goodison, B. E., Accuracy of snow samplers for measuring shallow snowpacks: an update, Proc. 35th Annu. Meet. East. Snow Conf., 1978, 36—49.
- [9] Paterson, W. S. B., The physics of glaciers, Pergamon Press Canada Ltd., June 1981, 3—13.
- [10] Goodison, B. E. et al., Handbook of snow, Pergamon Press Canada Ltd., Sept. 1981, 200—210.
- [11] WMO, Guide to hydrometeorological practices, WMO-No. 168, Geneva, WMO, 1970, 232—267.
- [12] 王彦龙,滇北和天山西部季节性积雪的若干物理特征,中国地理学会第2届全国冰川学术会议论文集,甘肃人民出版社,1987,187—194。

* * * *

作者简介 杨大庆,男,1959年9月生,副研究员,1988年获中科院兰州冰川冻土所冰川水文气候专业、自然地理学博士,现主要从事乌鲁木齐地区水资源及河源积雪观测研究,先后在国内外学术刊物上发表“乌鲁木齐河流域降水观测误差及修订的研究”等论文26篇。

A STUDY ON THE SNOW DENSITY IN THE HEAD AREA OF URUMQI RIVER BASIN

Yang Daqing Zhang Yingsheng Zhang Zhizhong

(Lanzhou Institute of Glaciology & Geocryology, Chinese Academy of Science)

Key words High alpine area; Deposited snow; New snow; Density

Abstract

The profile averaged snow density in the high alpine area of Urumqi river basin is 140 kg/m³ in the period of the formation of deposit snow during early winter (Oct.). It grows to 190—210 kg/m³ in the early period of stable snow cover during the middle winter (Nov.—Feb.) and reduces to 175 kg/m³ in the late period of stable snow cover during late winter and early spring (Mar.—Apr.). During the snow free period (May.—Sept.) the density of new snows ranges from 90 to 125 kg/m³, with an average of 112 kg/m³. According to statistical analysis, profile average snow density in winter does not relate to snow depth, and there is a negative correlation between the snow density and the 5-day averaged air temperature and the corresponding sum of the precipitation. In the summer the density of newly fallen wet snow increases with the snow depth significantly. And wind speed has no effect on the density of both the deposited snow in winter and the new snow in summer.