

前 言

积雪是随着冷空气的入侵形成的降雪及风吹雪搬运与堆积形成的覆盖在地面的雪层，以季节性积雪和多年积雪两种形式贮存在中高纬度地区和高山地区。积雪是我国北方重要的淡水资源，具有重要的生态价值和经济价值，但积雪造成的雪灾也是影响我国北方草原牧区畜牧业发展最重要的自然灾害。内蒙古草原牧区为季节性积雪分布区，也是雪害频繁发生的区域。降雪过多、积雪过厚和积雪维持时间过长会导致牧草被积雪掩埋，造成牲畜采食、饮水与行动困难，形成“白灾”，并严重影响甚至破坏交通、通讯、输电线路等生命线工程，危及牧民生命和生活安全，造成巨大的经济损失。

然而，积雪不仅仅是灾害的一种表现形式，更是水分的一种存在形式，在生态系统水分循环中占有重要的地位，并与土壤、大气、植被构成一个相互作用的整体。无论是自然降雪还是以风吹雪重新定位或被植被拦截的积雪，作为地球表面最为活跃的自然要素之一，雪在积雪深度、积雪密度、积雪液态含水率、积雪结构、吹雪及堆积过程、融雪过程、积雪与土壤界面的温度与水文效应等方面具有特殊物理特性，这些物理特性使之成为特殊的生态系统的环境或生境。雪的物理特性影响着雪内生物体的活动，也受到表层生物体特性的影响，调节并改变积雪与植物、大气、水分和土壤之间的相互作用，成为生态学研究的重点。

季节性积雪是内蒙古草原灾害的一种表现形式，更是草原不可多得的水资源和土壤水分补给源，对促进草原植物发芽、生长发育和返青具有重要作用。本书以内蒙古典型草原积雪及风吹雪为主题，针对内蒙古草原积雪时空分布特征、风雪流结构特征和风吹雪二次分配变化规律，以及积雪消融期对土壤水热状况和植被生长特征的影响，提出了内蒙古草原雪害防治原则与策略，构建了草原雪害防治体系。本书可为典型草原生态系统草原积雪量的估算、积雪调控、植被恢复和风雪灾害的防治提供科学依据。

本书共 8 章，编写分工如下。第 1 章积雪概述，主要阐述积雪的概念、分布，以及积雪与植被的相互作用，由左合君、王海兵、陈雪、燕宇编写。第 2 章草原积雪、风吹雪理论及其防治，主要阐述草原积雪的特性、密实化过程，以及风吹雪过程、风吹雪害及其防治，由王海兵、刘宝河、闫敏编写。第 3 章典型草原积雪的时空分布，主要阐述积雪的时空分布特征、时空变异，以及气象因子对积雪的影响，由王嫣娇、左合君编写。第 4 章典型草原风雪流的结构特征，主要阐述

草原近地表风速廓线、风雪流结构及移雪量与移雪强度，由刘宝河、左合君编写。第 5 章典型草原风吹雪二次分配，主要阐述草本植物和灌丛的阻雪滞雪能力，由闫敏、左合君编写。第 6 章积雪及其消融对土壤水热状况的影响，主要阐述积雪消融与气温、土壤温度和土壤含水率的关系，由董智、任喜珍编写。第 7 章积雪对草原牧草返青的影响，主要阐述积雪深度对土壤温度、牧草返青及生长发育的影响，以及积雪深度与牧草生长发育规律的关系，由董智、王玉涛、闫敏编写。第 8 章草原雪害及其防治，主要阐述内蒙古草原雪害区划、等级判别、防治原则与策略及防治技术体系，由左合君、董智、闫敏、张晔编写。全书由左合君、闫敏、张晔统稿，内蒙古农业大学胡春元教授担任主审。

本书的出版得到国家自然科学基金地区项目“锡林郭勒典型草原积雪与植被相互作用效应及机制”（2014~2017 年，项目编号：41361012）和内蒙古自治区自然科学基金项目“内蒙古积雪资源及其对土壤水热条件影响机制的研究”（2006~2008 年，项目编号：200607010601）的资助，在此表示衷心感谢。

限于作者的水平，本书疏漏之处在所难免，恳请各位同仁及读者指正。

著 者

2024 年 5 月 20 日

目 录

前言

第1章 积雪概述	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 积雪	1
1.1.2 积雪量	3
1.1.3 积雪过程	4
1.1.4 雪型分类	6
1.2 积雪分布	7
1.2.1 我国积雪分布	7
1.2.2 内蒙古积雪分布	9
1.2.3 典型草原积雪分布特征	10
1.3 积雪与草原生态	12
1.3.1 积雪对草原生态的影响	12
1.3.2 草原对积雪的反馈作用	15
主要参考文献	16
第2章 草原积雪、风吹雪理论及其防治	20
2.1 积雪特性	20
2.1.1 物理特性	20
2.1.2 化学特性	28
2.2 积雪的密实化过程	29
2.2.1 深度变化过程	29
2.2.2 密度变化过程	33
2.3 风吹雪过程	40
2.3.1 雪粒运动的影响因素	40
2.3.2 风雪流运动特征	42
2.4 风吹雪防治	44
2.4.1 风吹雪害	44
2.4.2 草原风吹雪害	45

2.4.3 风吹雪防治技术	45
主要参考文献	47
第3章 典型草原积雪的时空分布	50
3.1 积雪的时空分布特征	50
3.1.1 时间变化特征	50
3.1.2 空间变化特征	53
3.2 积雪的时空变异	56
3.2.1 周期性与突变性特征	56
3.2.2 空间变异特征	64
3.3 气象因子对积雪的影响	75
3.3.1 气象因子的动态变化	75
3.3.2 气象因子的分布特征	78
3.3.3 气象因子与积雪的关系	78
主要参考文献	80
第4章 典型草原风雪流的结构特征	81
4.1 近地表风速廓线	82
4.1.1 裸露雪面风速廓线	82
4.1.2 植被出露下风速廓线	85
4.2 风雪流结构	87
4.2.1 风速对风雪流结构的影响	87
4.2.2 积雪时间对风雪流结构的影响	91
4.2.3 积雪深度对风雪流结构的影响	92
4.2.4 植被对风雪流结构的影响	93
4.2.5 地形对风雪流结构的影响	95
4.3 移雪量与移雪强度	96
4.3.1 单宽输雪率	96
4.3.2 移雪量垂向分布	99
4.3.3 移雪强度与近地表风速的关系	105
主要参考文献	106
第5章 典型草原风吹雪二次分配	108
5.1 草本植物阻雪滞雪能力	108
5.1.1 植被高度对积雪深度的影响	109
5.1.2 植被盖度对积雪深度的影响	110

5.1.3 降雪量与积雪深度	112
5.2 灌丛阻雪滞雪能力	112
5.2.1 灌丛积雪形态特征	113
5.2.2 灌丛的滞雪范围	125
5.2.3 灌丛的阻雪量	131
主要参考文献	137
第6章 积雪及其消融对土壤水热状况的影响	138
6.1 积雪消融与气温的关系	139
6.1.1 积雪消融厚度与气温的关系	139
6.1.2 不同积雪类型区积雪消融与气温的关系	141
6.1.3 不同积雪深度对气温的响应	143
6.2 积雪消融与土壤温度的关系	144
6.2.1 积雪消融期对土壤温度的影响	144
6.2.2 积雪消融后对土壤温度的影响	147
6.2.3 消融期积雪对土壤温度梯度的影响	149
6.2.4 消融期积雪覆盖下地表温度与气温的关系	151
6.3 积雪消融与土壤含水率的关系	153
6.3.1 伊尔施镇融雪水对不同地类含水量的影响	153
6.3.2 内蒙古农业大学试验田融雪水对不同地类含水量的影响	156
6.3.3 黄合少镇融雪水对不同地类含水量的影响	157
6.3.4 赛罕乌拉国家级自然保护区融雪水对不同地类含水量的影响	158
6.3.5 影响融雪水下渗的因素	159
主要参考文献	163
第7章 积雪对草原牧草返青的影响	164
7.1 积雪深度对土壤温度和土壤含水量的影响	164
7.1.1 不同积雪深度下土壤温度的日变化规律	165
7.1.2 不同积雪深度下土壤表层日平均温度的变化规律	167
7.1.3 不同积雪深度下不同土层温度的变化规律	169
7.1.4 不同积雪深度下不同土层平均含水量的变化规律	172
7.1.5 不同积雪深度对各土层含水量变化的影响	173
7.2 积雪深度对牧草返青及对牧草生长发育的影响	177
7.2.1 不同积雪深度下牧草返青时间和返青率	177
7.2.2 不同积雪深度下牧草返青数量的比较	178

7.2.3 不同积雪深度下牧草生长速度的比较	179
7.2.4 不同积雪深度下牧草生物量积累变化分析	181
7.3 积雪深度与牧草生长发育规律的关系	183
7.3.1 草地类型对积雪深度的影响	183
7.3.2 积雪深度与牧草生长的关系	184
主要参考文献	185
第8章 草原雪害及其防治	186
8.1 内蒙古草原雪害区划	186
8.1.1 区划原则	186
8.1.2 雪害区划指标体系及其设置	187
8.1.3 雪害区划方法	188
8.1.4 公路雪害区划及其特征	189
8.2 草原雪害等级判别	192
8.2.1 积雪雪害等级判别	192
8.2.2 风雪雪害等级判别	193
8.3 草原雪害防治的指导思想、原则与策略	193
8.3.1 指导思想与原则	193
8.3.2 防治策略	194
8.4 草原雪害的防治技术体系	194
8.4.1 挡雪墙	194
8.4.2 浅槽风力加速堤	196
8.4.3 防雪栅栏	209
8.4.4 导风板	211
8.4.5 挂草网围栏	212
8.4.6 防雪林	217
8.4.7 育草蓄雪	222
主要参考文献	227
附图	

第1章 积雪概述

冰和雪是冰冻圈的基本组成部分，是地球上分布广泛的自然资源。季节性积雪是冰冻圈中体积最小的积雪类型。风吹雪对自然积雪有再分配的作用，是形成积雪的物质来源之一，能诱发并加重各种风雪灾害，直接给经济建设与人民的生命财产造成严重损失。积雪表面的高反照率、内部冰/水相变产生的潜热及积雪层的绝热效应显著影响着全球气候，而季节性积雪的积累和消融对全球能量和水分循环也有存储、再释放的滞后效应，进而对植物、动物和微生物以及生物地球化学循环管理和自然生态系统产生很多影响。本章将系统总结现有研究成果，阐明积雪的基本概念、我国积雪分布及积雪对草原生态环境的影响。

1.1 基本概念

1.1.1 积雪

冰和雪是冰冻圈的基本组成部分，是地球上分布广泛的自然资源。与冰雪相关的许多过程主要受大量能量引起的临界行为所影响，这些行为在液态和冷冻态水之间的相变过程中释放或消耗能量。季节性积雪是冰冻圈中体积最小的积雪类型。积雪是地球表面存在时间不超过一年的雪层，积雪的衰变是表面上的融化，是能量平衡的结果，受到温度和太阳辐射的强烈影响。

积雪对气候系统起着非常重要的作用。相较于其他自然地表，积雪地面对太阳辐射具有较高的反照率，入射的太阳辐射能量仅有很少的部分被积雪覆盖区域所吸收。地球表面反照率的细微变化会影响到地-气系统的能量平衡，进而引起气候变化。积雪地面反照率的异质性很大，新雪的反照率可以高达 0.8~0.9，一般在 0.6 以上，重度污化积雪的反照率仅为 0.1 左右，而无雪的地表反照率为 0.15~0.2。积雪能够在很大程度上影响下垫面对短波辐射的吸收，无雪地面吸收的热量有为雪地面的 2~4 倍。显然，积雪区反照率高，积雪消融区反照率低，如果地面被雪覆盖，平均气温会显著降低（约低 5℃），这将对积雪的保存产生正反馈作用，可以进一步增加初冬的积雪，并使晚春积雪持续更长时间。积雪是一种极好的环境绝热材料，可为植被和冬眠动物提供隔热层。雪有很高的绝缘能力，这意味着若有积雪，大气和地面之间的能量通量会大大减少，若无积雪，季节性冻土层会冻结到更深处（Hayashi, 2013）。积雪是淡水的天然存储库，可延缓水体排放达

半年之久，这种储存对冰雪区水文情势的季节分布有重大影响。世界各地全年积雪面积变化很大。例如，在北美洲，冬季积雪覆盖将近 50% (4500 万 km^2)，而夏季则不到 4% (300 万 km^2)。全球超过 10 亿人的用水依靠季节性积雪或冰川融水生存 (Beniston et al., 2003; Barnett et al., 2005)。

季节性积雪被称为大气和地球表面之间的“连接窗口” (Barry et al., 2007)。与海冰、冰川和永久冻土相比，季节性积雪对气候变化反应最快，与全球辐射平衡息息相关。较高的全球温度减少了空间和时间上的积雪范围，降低了全球平均反照率。这种全球反照率的降低加强了气候系统的变暖趋势，从而进一步减少了积雪的覆盖范围。这种自我强化效应（正反馈循环）是在受积雪影响的高纬度和高海拔地区观测到的气候变化比其他地方明显得多的主要原因之一 (Ohmura, 2012)。季节性的积雪覆盖在浮冰上，可防止浮冰迅速融化，但它本身也受到浮冰的保护，防止它在开阔水域迅速融化。在寒冷环境中，积雪、其他冰冻圈成分、水圈和生物圈之间也存在重要的相互作用。大陆冰原和冰川的质量平衡取决于积雪的积累。同样，冻土表面的能量通量基本上是由积雪的高反照率和有效的隔热能力决定的。

大陆冰盖是地球上最大的冰体。凭借其巨大的质量、高反照率的寒冷雪面以及及与海洋直接接触的边缘冰体，大陆冰盖成为全球环境变化的关键驱动力，显著影响着全球的物理和生物条件，并可能在长时间尺度上引发潜在的灾难性变化。北极海冰的消失越来越有可能大大缩短大西洋和太平洋之间的航运路线。这一点，连同对自然资源的勘探和开发，很可能给北极和亚北极环境带来污染和严重生态干扰。降雪/积雪持续时间的减少以及冰川的消失将极大地影响中低纬度山区周围人口稠密地区径流和淡水供应的季节性。积雪和冰川融水的缺乏严重限制了干旱/暖季农业、能源生产等方面的可能性范围。地表和地下冰的消失可能会在全球范围内影响高山坡地的稳定性，在许多地方可能会造成与山体滑坡和受其影响的堰塞湖引发的泥石流过程相关的风险增加。与冰川消失和破坏以及冰盖融化相关的海平面上升在未来几个世纪可能远远超过几厘米，对沿海居住区和基础设施构成根本性威胁，对近海平原生态系统和河流形态产生巨大影响 (Allison et al., 2014; Church et al., 2007)。北极地区富冰永久冻土的持续融化将强烈影响基础设施的地面稳定性、地表水/地下水以及植被的生长条件 (Streletskiy et al., 2014)。解冻也可能释放出被封存在永久冻土中的温室气体，从而加剧全球变暖。

冰雪的影响远远超出了其地理范围，在旱季可为灌溉、工业和家庭提供融水 (Seibert et al., 2014)。在寒冷地区，河流和湖泊冰可以方便偏远地区的交通。冰雪时空分布的变化可能产生一系列不好的后果。尽管未来气候环境的确切细节仍然难以预测，但气候变化将强烈地改变地球上的冰雪条件，在短期、中期和长期内增加许多灾害，尽管一些灾害和一些危险地点可能随着某些地方

的冰完全消失而不复存在。持续的冰雪损失所造成的环境变化，哪怕程度看似轻微，仍可能引发长期存在的重大影响。不同环境组分对气候变化的不同响应导致复杂的环境地质。生态系统的不平衡日益加剧。就灾害的规模和我们及时适应新条件的能力而言，人类对气候系统干扰影响的变化速度将是至关重要的，变化的速度越慢，为适应冰雪覆盖大大减少的环境而作出困难决定和实施政策的自由度就越大。

1.1.2 积雪量

积雪可以用许多不同的方式来描述。虽然雪深很容易测量，但由于雪水当量是直接有助于径流的雪水含量，因此雪水当量对于大多数雪水水文问题而言是一个与积雪相关性更高的属性。雪水当量定义为单位地表面积完全融化积雪后所获得的液态水量。雪水当量 (S_{WE} , mm) 与积雪深度 (d , m)、积雪密度 (ρ_s , kg/m³) 和水密度 (ρ_w , 1000kg/m³) 直接相关 (见式 1-1)。积雪密度可能差异很大 (DeWalle and Rango, 2008)。新雪通常密度最低，约为 100kg/m³，密度随着老化积雪的增加而增加，干燥的旧雪密度为 350~400kg/m³，而湿的旧雪密度则高达 500kg/m³。夏天没有融化的雪密度通常在 550~800kg/m³。

$$S_{WE} = 1000d \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1-1)$$

不同类型的降水如雪（湿或干）、霰、冰雪（或冰球）、冻雨、冻毛毛雨、雨和毛毛雨等，也会影响积雪的密度。大气的温度和水分含量决定雪晶的类型，雪晶的类型也会影响积雪的密度。最复杂的晶体结构往往会形成轻、低密度的积雪，因为它们的分支之间的间距很大。较小的晶体如板状晶体、针状晶体和柱状晶体，往往会形成高密度的积雪，因为它们非常有效地聚集在一起，留下很少的空间给气囊。由于上层压力的增加而引起的积雪密度的变化是由于大量的新雪落在旧雪上造成的。雪密度的增加可导致积雪导热系数的增加。

在流域尺度上，流域的储雪量是由雪水当量的空间分布决定的，雪水当量在很大程度上受雪深的空间分布控制。地面采样是获取积雪深度或雪水当量的传统方法。该方法需在流域内依据地形布设测点网络，通过定期定点观测积雪深度和密度，结合空间插值估算流域内积雪深度和雪水当量的空间分布。然而，这种方法人力需求大、测量误差显著，难以满足区域性研究需求。

虽然光学卫星遥感数据的空间分辨率能满足建模要求，但是光学卫星遥感数据仅能提取积雪面积，无法直接获取雪水当量。为突破此限制，遥感研究领域提出了一种基于积雪衰减曲线估算雪水当量的新思路。研究者认为，在特定区域，积雪面积与雪水当量之间存在定量关系，此关系即定义为积雪衰减曲线

(Martinec, 1975)。掌握特定区域的积雪衰减曲线后,即可将光学遥感影像提取的积雪面积数据转换为雪水当量。该方法有望大幅提升雪水当量产品的空间分辨率,满足中小流域尺度的应用需求,对准确预测积雪消融期的季节性径流具有重要意义。

1.1.3 积雪过程

雪的晶体形成于高空云层中,降雪是大气降水的一种形式。当水汽压超过水汽饱和点,大气中水汽过饱和时,形成云。当云中温度低于 0°C 时,出现过冷的水汽和合适的气溶胶,以饱和的空气团中的尘埃粒子为核心,通过吸引过冷的水滴,然后以晶体的形式凝聚,雪锥形冰晶体便在云中形成。

雪花降落到地面以后,并非一直保持着原来的形状,而是在不断地变化着。积雪雪层的构造、雪晶的表面特征以及大量雪的显微结构表明,雪晶有丰富的变化形态。

降到地面上的雪,若没有立即融化就会一层层堆积起来,形成积雪。在初冬无风条件下,降雪十分疏松,维持着大气中凝华时所形成的雪晶状态。积雪表面上的降雪,使雪晶有所增大,原晶形消失,雪晶变得更圆滑,变为细小的粒状雪,雪的密度增大。随着时间推移和气温降低,处于底层内部的雪粒继续增大,使原来变圆的雪晶又形成新棱角。进入隆冬后,雪层下部可看到一种粗大棱柱状像霜一样的雪。其数量不断增加,并从雪层底部逐渐扩展到雪层中上部。初春来临,积雪表面开始融化,无论新雪或老雪雪晶均迅速变圆、变密,甚至可在雪层中形成透镜状的冰夹层。随着气温上升,融水渐向雪层深处渗浸,更多的雪晶变圆。最后,全部积雪层变成单一但具有不同粒径的粒状雪。积雪层的这种演变过程是在自身和外界因素的影响下雪结构的变化过程,称为变质作用。

雪堆在地面积聚后,雪晶变质过程立即开始。大自然中,大多数雪晶变化与积雪中的压力和温度变化有关(DeWalle and Rango, 2008)。下面简要介绍 3 种主要类型的积雪变质作用(等温变质作用、温度梯度变质作用和融冻变质作用)。

等温变质作用的核心机制是水汽从高曲率(凸面)冰晶表面向低曲率(凹面)冰晶表面迁移。这是由于凸面冰晶具有更高的饱和水汽压。该过程导致冰晶形态逐渐圆化。圆化后的冰晶因具有更优的颗粒重排能力而增强了雪层的压实潜力,从而提升雪层稳定性并降低雪崩风险。

温度梯度变质作用是由于雪层温度变化而发生的,这是雪层融化前密度增加的最重要的过程。其物理原理是较暖雪层的蒸汽压高于较冷雪层。这种梯度导致水蒸气在雪层内部向上迁移,即从较暖的地表向较冷的雪面移动。这个过程导致形成一个新的层,其中包含大型的、彼此连接不良的晶面晶体(深度霜),因此,

山坡上的雪层稳定性较低,更容易发生雪崩(Fierz et al., 2009)。这个深度霜层只能通过雪坑分析来识别,但由于需要较多的时间和精力,这种分析很少进行,因此,它具有潜在的危险。

融冻变质作用在春季是典型的,此时空气和积雪温度由于太阳辐射的增加而升高。积雪表面的雪往往首先融化,通常是小雪粒先融化,因为它们的融化温度比大雪粒低。融化的雪可以涓涓细流进入积雪较冷的中间部分,在那里重新冻结,形成连接良好的大颗粒积雪。在积雪融化之前,积雪中通常会存在一定量的液态水,通常为2%~5%,最高为10%。较高比例的液态水会形成特定类型的雪和水运动,称为泥流,通常会激活表层土壤。融冻变质作用通常会增加积雪的稳定性。另外,雪崩的危险随着雪堆中储存的液态水体积的增加而增加。

例如,新雪在等温变质作用下变成较密实的中雪一般需经过3个阶段。由温度梯度变质作用为动力引起的水汽迁移,它不仅使变质作用更强烈、雪晶互相合并、粒晶增长更快,而且它与圆化过程正好相反,在凝华晶体表面重新发生冰晶,形成棱角。尤其在积雪底部开始发育粗大有棱角的棱柱状晶体,这些棱柱状晶体的发育受温度梯度的控制。实验证明,棱柱状晶体临界值为 $0.20^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 。低于此值,棱柱状晶体生长十分缓慢或停止;高于此临界值,棱柱状晶体(特别是长轴为3mm的晶体)生长十分迅速。这种凝结过程的产物叫深霜。春季当气温上升到 0°C 以上时,白天积雪表面发生融化,融水下渗到雪层内部,夜间雪层温度下降到 0°C 以下,又局部或全部发生冻结。在融化与冻结作用交替的过程中,雪晶迅速圆化、合并,形成一种新的晶体——融冻粒雪。这种变化过程称为融冻变质作用。在风的作用下,雪粒在积雪表面滚动、跳跃,互相碰撞,棱角很快被磨平,密度增大,形成细小而致密的风雪流。在雪崩时,雪粒互相混合、挤压并伴随着局部融化与再冻结作用,使雪的密度急剧增大,形成无层次的雪崩雪。融冻粒雪和雪崩雪的形成与上述三种基本的热力变质作用有所不同,其能量主要来自机械动力,因此称为动力变质作用。

风吹雪地区变质作用的特点:在风雪流堆积区,积雪一般较厚,是平坦地区积雪深度的3~8倍。由于风的筛选作用,风雪流堆积区小于 0.5mm 粒径的雪占90%以上,积雪密度多在 $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ 以上。加之雪层厚,晶形圆滑而单一,雪层中的温度梯度小。因此,温度梯度变质作用(又称构造性变质作用)差,只在雪层底部有深霜出现。在风雪流吹蚀区,大部分积雪被吹走,一般地表仅有5~20cm的积雪。在大风和低温条件下,温度梯度变质作用旺盛,深霜粒径多在6mm左右,整个雪层几乎全由松散深霜和聚合深霜组成。风雪流堆积区—吹蚀区(简称平衡区),在东、西风交替作用下(晴天多吹东风或东南风,阴雪天多为西风或西北风),雪层变质作用介于上述两区变质作用之间,除地表有新雪和松散深霜夹粗雪外,大部分仍由松散深霜与聚合深霜组成(王中隆,1983)。

1.1.4 雪型分类

积雪分类是对积雪的雪层剖面进行层位划分或者对整个积雪区进行类型划分。雪层剖面的层位划分依据的是雪颗粒和雪层的微观结构、形态特征和物理参数，指标较多，划分的类型也多。例如，根据雪颗粒特征可分为新雪、细雪、中雪、粗雪、深霜等；根据颜色可分为洁净雪、污化雪等；根据密度、硬度、含水率、温度等也可划分出多种类型。依据积雪成因及其所在地理环境等，积雪可分为冻原积雪、针叶林积雪、高山积雪、草原积雪、海洋积雪等。

雪花是在大气中形成并向地面降落的冰晶体的聚合体。最初云层中过冷却水滴冻结成冰晶，冰晶在下落过程中相互碰触，部分晶体通过合并（融合为单体）或聚合（粘连成团）增大体积，同时大气中的水汽在晶体表面凝结进一步促进晶体的生长。因温度、湿度、气压及风力等条件的时空差异，到达地面时这些冰晶聚合体的形态和体积各有不同，以至于不存在结构、形态和尺寸等各个方面完全相同的雪花，但它们最基本的形态为六角形（图 1-1）。

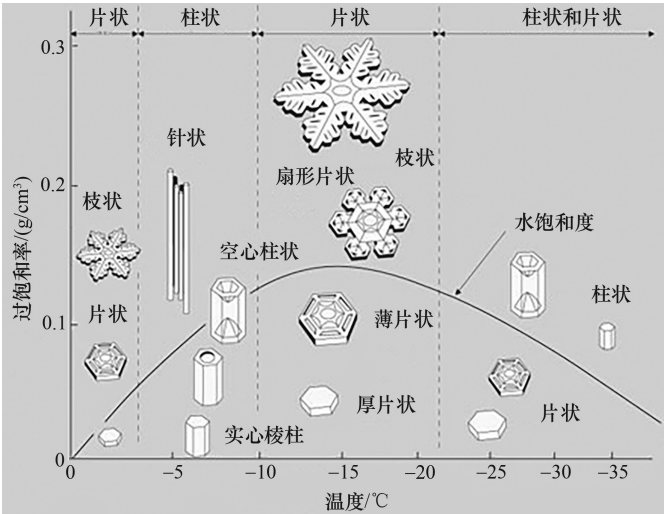


图 1-1 不同温度和湿度形成的雪花形态（改自 Connors, 2024）

由于区域气候、年平均气温、积雪温度和积雪温度梯度的不同，雪的变质作用、变质过程以及变质作用类型也不相同。因此，区域积雪类型的变化也大。国内外雪型的分类方法虽然较多，但都是以粒径为指标来划分的。比较国际上、日本冰雪学会和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所（原中国科学院兰州冰川冻土研究所）的雪型分类，我国雪型的分类（表 1-1）更能体现数量化指标，

便于实践操作。

表 1-1 我国雪型的分类

粒径/mm	雪型	粒径/mm	雪型
<0.5	新雪	2~2.99	粗雪
0.5~0.99	细雪	3~4	深霜
1~1.99	中雪	>4	聚合深霜

1.2 积雪分布

1.2.1 我国积雪分布

1.2.1.1 我国降雪与积雪概况

由于我国冬季风特别强盛，气温低，大部地区冬季的降水多以降雪的形式出现，降雪的南限在 24°N 左右，个别极端寒冷的年份，寒潮暴发时，广西南宁、崇左（龙州县）到云南河口瑶族自治县一带也可见到飞雪。一般而言，冬季降雪和积雪对农牧业生产是有利的。北方冬季寒冷，在冬小麦产区北界附近冬小麦常受冻害，而雪是热的不良导体，积雪可以减轻冻害；由于有积雪，牧区也解决了牲畜饮水的问题；同时，降雪时能湿润大气，起到净化空气的作用；此外，积雪到春天融化，又可不同程度地减轻北方的春旱。但是雪量过多（大雪），牧区积雪过厚，也会发生“白灾”，如蔬菜大棚被压垮，竹株、果树被压断等。大雪对交通运输及人们出行等也有很大影响。

1.2.1.2 平均降雪期的分布

各地降雪平均的初终期与纬度、地形和地势有关。一般说来，降雪初期自南而北提早，终雪日期自南而北推迟，降雪期从南向北延长。大兴安岭的阿尔山以北地区降雪期最长，从 9 月中下旬至翌年 5 月中下旬，长达 8 个月之久；黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古及山西的降雪期在 10 月至翌年 4 月之间，6 个多月；华北平原大致在 11 月下旬至 12 月上旬开始降雪，3 月中旬终雪，4 个月左右；长江中下游地区的降雪期在 12 月中下旬至翌年 3 月上中旬，有 2 个多月；贵州降雪期在 12 月中下旬至 2 月下旬，有 2 个多月；四川盆地因冬天气候比较温暖，1 月中旬才见初雪，降雪期不到 1 个月，与南岭山地、闽北的降雪期相当；南岭以南的地区降雪很少；西北黄土高原河西走廊及准噶尔盆地 10 月下旬至 11 月上旬开始降雪，3 月下旬至 4 月上旬终雪，降雪期长达 5 个月；关中地区降雪期为 4 个月。气候干旱地带降雪期短，如阿拉善高原降雪期为 11 月中旬至翌年 3 月中旬；塔里

木盆地是 12 月中下旬至翌年 2 月上中旬。由盆地沿山麓而上,随着地势的升高降雪期迅速延长,至天山中山地带,降雪期已长达 8 个月以上。青藏高原的降雪期以藏东南地区最短,为 12 月上旬至 4 月上旬;沿雅鲁藏布江向西,降雪期渐长,至日喀则是 11 月上旬至翌年 5 月上旬;青藏高原东部地形复杂,地势差异悬殊,降雪期差别很大,不少高山峻岭终年雪天不断。

1.2.1.3 降雪日数的地理分布

我国年降雪日数,一般是东部地区的雪日从北往南逐渐减少。东北地区纬度高,冬半年气温低,湿度大,气旋活动频繁,降雪日数为我国东部地区之首。东北山地(含内蒙古东部大兴安岭北段)年降雪日数大多在 40d 以上,图里河、博克图镇和东风区、长白山一带降雪日数多达 100d 以上,是我国降雪日数较多的地区之一;东北平原(不含内蒙古的东北地区部分)降雪日数为 20~40d;内蒙古降雪日数一般 15~30d;华北平原直至南岭的广大地区降雪日数普遍只有 5~15d;四川盆地降雪日数不足 1d;黄土高原降雪日数为 15~25d;南疆和阿拉善高原因气候干旱,降雪日数多在 15d 以下;北疆为冬季北冰洋气团入口要冲,降雪较多,降雪日数一般为 40~75d,天山的部分山地降雪日数超过 100d;藏东南因纬度和地势低,降雪日数不到 5d,比东部江南地区还少,暖湿的西藏南部谷地降雪日数在 10d 以下,但西藏南部山地降雪日数较多,在 40d 以上,局部达 100d 以上;西藏北部高原降雪日数大多在 50~80d,巴颜喀拉山和唐古拉山脉是西藏北部高原降雪日数较多的地区,一般在 100d 左右,是我国降雪日数较多的地区之一;青海湖一带降雪日数为 30~50d;柴达木盆地降雪日数在 20d 以下。

1.2.1.4 积雪日数分布

只有在近地面空气层温度较长时间内保持在 0℃ 以下的地区才能形成积雪。积雪在水平和垂直方向上都有明显的地带性,一般积雪日数随着纬度的增加而增加,同时也随着地势的升高而增加。呼伦贝尔根河以北地区雪日多,雪量大,而且气温低,湿度大,蒸发比较慢,积雪期最长,年积雪日数在 160d 以上;呼伦贝尔高原、小兴安岭、三江平原、松嫩平原北部、长白山大部、北疆大部和青海南部的部分地区积雪日数为 100~160d;东北西南部、黄土高原、青藏高原中东部等积雪日数为 20~60d;华北平原及关中等地积雪日数为 10~20d;淮河至南岭大部积雪日数在 10d 以下;四川盆地及南岭山地积雪日数不足 1d。

1.2.1.5 最大积雪深度

全年积雪最厚的地区是北疆和东北地区。天山、阿尔泰山、大兴安岭等地的部分地区最大积雪深度可达 60cm 以上;大兴安岭大部、小兴安岭、长白山地区、

环渤海地区、黄河中下游至长江中下游的广大地区、滇西北、藏南地区山地等地最大积雪深度可达 20~40cm；东北平原西部、河北平原南部、西北地区东部、青藏高原中东部、云贵高原中北部及长江中下游的部分地区最大积雪深度为 10~20cm；四川盆地、柴达木盆地、南疆大部及内蒙古西部等地区最大积雪深度在 10cm 以下；25°N 以南地区则为无积雪区。

1.2.2 内蒙古积雪分布

1.2.2.1 内蒙古草原牧区降雪与积雪概况

内蒙古历史上频频出现大（暴）雪灾害。资料表明，1961~1999 年内蒙古发生大（暴）雪过程 70 次，其中大雪过程 44 次，暴雪过程 26 次，平均每年接近 2 次。一般平均风力 7~8 级，平均降雪量 >8mm，平均降温 8℃，若降雪的同时有强冷空气影响，还会形成暴风雪，可在很短时间内形成严重的灾害。

1.2.2.2 降雪期、积雪期的分布

我们根据内蒙古气候图谱对 1961~1998 年 111 个气象台（站）的降雪资料进行了统计分析。结果表明，内蒙古地区初雪日为 9 月中下旬，之后陆续出现降雪天气，直到翌年 5 月下旬降雪天气才结束，降雪期长达 8 个月。积雪期从 10 月中旬到翌年 5 月上旬，近 7 个月。

从内蒙古降雪日数和积雪日数上看，呼伦贝尔市大兴安岭山区每年降雪日数多达 10~30d，积雪日数长达 180d 以上。而内蒙古西部的广大地区每年降雪日数和积雪日数不足 15d，其中，阿拉善盟、乌海市及巴彦淖尔市西部地区降雪日数和积雪日数均在 10d 以下。内蒙古中部地区降雪日数在 20d 左右，积雪日数在 125~150d。

1.2.2.3 降雪量、积雪量的分布

考虑到内蒙古地区降雪的气候特征，将当年 10 月至翌年 3 月定义为冬季。根据 1961~2000 年冬季的月降雪量资料，统计绘制出冬季降雪量多年平均逐月分布图（图 1-2a）。由图 1-2a 可知，内蒙古地区降雪月份中 10 月降雪量最大，3 月次之，1 月最少，12 月次少；12 月至翌年 2 月降雪量变化幅度不大，10~12 月、2~3 月的降雪量变化幅度较大。按照进入冬季的时间序列将冬季划分为 3 个时段，即前冬期（10~11 月）、隆冬期（12 月至翌年 1 月）和后冬期（2~3 月）。显然，隆冬期降雪量少，变化小；而前冬期和后冬期分别为降雪量的递减和递增时期，降雪量大，变化显著，为过渡时期。

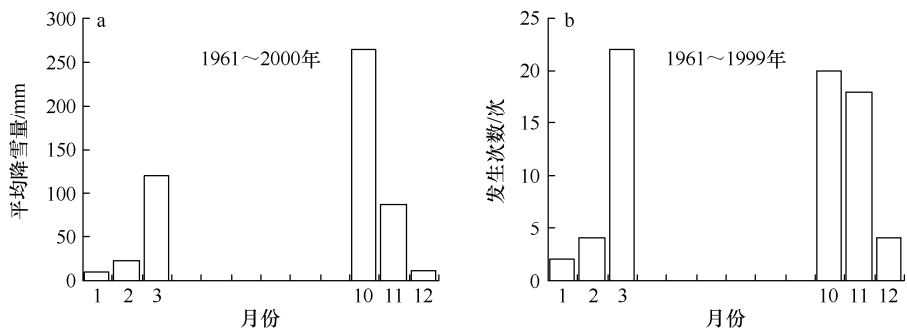


图 1-2 内蒙古地区冬季多年平均降雪量 (a)、大雪和暴雪发生次数 (b)

气象上的降雪等级是以雪融化后的水来度量的。一般按 24h 内降水量（粗略地估计，10mm 深的积雪仅能融化为 1mm 的水）把雪分为 4 个等级：降水量 0.1~2.4mm 的雪称为小雪；降水量 2.5~4.9mm 的雪称为中雪；降水量 5.0~9.9mm 的雪称为大雪；降水量 10mm 及以上的雪称为暴雪。按照大雪和暴雪的标准，对 1961~1999 年的各次降雪过程进行统计（图 1-2b），结果显示，大雪 44 次、暴雪 26 次。对大雪及暴雪在各月的出现情况进行统计，大雪、暴雪在各月的发生情况差异也较大。对应冬季 3 个时段，大雪、暴雪在前冬期最多，共计 38 次，后冬期共计 26 次，而隆冬期仅有 6 次。可见，内蒙古的大雪、暴雪主要出现在前冬期和后冬期这两个时段。

从内蒙古地区降雪及大雪、暴雪的时间分布来看，前冬期（10~11 月）及后冬期的 3 月为降雪及大雪和暴雪的主要分布时段。这两个时段降雪量大，且为季节转换期，风速变化剧烈，故该时段是公路风吹雪的主要防治期。隆冬期降雪少，大雪、暴雪过程较弱，而前冬期的降雪已经过一段时间的吹刮再分布和凝结、融化等过程，故该时段是公路风吹雪的次要防治期。

1.2.3 典型草原积雪分布特征

1.2.3.1 积雪区草原类型

根据内蒙古草原的植被分布类型，内蒙古草原区可分为东部的草甸草原、中部的典型草原和西部的荒漠草原。内蒙古草原区积雪覆盖率从大到小的顺序为草甸草原区>典型草原区>荒漠草原区。

草甸草原区属于温带大陆性季风气候，年降水量 250~400mm，自东南向西北递减；年平均气温 -3~0℃，自东南向西北递减；年平均风速 3.0~4.3m/s，无霜期 80~120d。草甸草原区的草群草层高度一般为 20~60cm，盖度为 50%~80%，丰富度约为 20 种/m²。