

中国季节积雪资源的初步评价*

李 培 基

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

提 要

本文根据 2300 余个地面气象台站从 1951 年(或建站)到 1980 年逐日积雪与降雪观测资料,计算出我国年平均降雪补给量为 $3451.8 \times 10^8 \text{m}^3$, 冬季平均积雪贮量为 $535.6 \times 10^8 \text{m}^3$, 阐明了季节雪资源的地理分布规律,季节分配特征和长期变化趋势。指出了 CO_2 增温可能导致我国季节雪资源分布的区域分异倾向进一步加剧,引起北方土壤干旱化。三十年来,雪资源的波动是全球海气异常的结果。多雪冬天与厄尔尼诺南方涛动相同步。雪资源的两个正、负距平时期与我国农田受旱面积的两个明显的低高值时期基本吻合。长期变化趋势准确地反映出了全球气温变化过程,并与气温变化成正相关。

关键词 季节积雪资源 年降雪补给量 冬季积雪贮量 积雪资源地理分布 积雪资源年内分配 积雪资源变化趋势

积雪是重要的淡水资源。大气降雪是积雪资源的补给来源,它以季节积雪和永久雪冰的形式贮存在高、中纬度地区和高山地区,最后以春季融雪径流和夏季冰川融水方式转化为径流资源。全球陆地每年从降雪获得的淡水补给量为 $59\ 500 \times 10^8 \text{m}^3$, 积雪季节变化和年际变化所引起的海面升降分别达 5mm 和 1mm。

季节积雪融水补给着我国许多重要河流,长江、黄河源头地区水文情势也受到它的支配,我国“三北”地区春季土壤墒情和农业灌溉依赖冬季积雪贮量。 CO_2 引起的气候变化必将导致我国积雪水资源的波动,从而对环境和北方农业收成发生深刻的影响。

一、季节积雪资源贮量的分析计算

在统计分析了 300 多个地面气象台站从 1951 年(或建站)到 1980 年逐日积雪深度、积雪密度以及降雪量观测资料的基础上,按降雪补给量和积雪贮存量分类系统组成季节积雪资源同步系列。考虑到积雪时空分布的复杂多变性,对观测资料不做订正、插补、延长等处理。降雪量资料是从各省、市、自治区气象局整编的 1951 年—1980 年逐日降水资料中统计出来的。逐月积雪深度和积雪密度资料摘自气象月报表,并按逐日、逐月、逐年进行了整编。各省、自治区积雪资源数量是根据单站资料用算术平均方法计算的。全国积雪资源数量则用下述两种方法估算:(1) 根据各省、自治区面积,用面积加权平均;(2) 从所绘制的全国雪资源分布图 ($1:1000 \times 10^4$) 上量算出。我国积雪在时间上不连续,积雪

* 本文在施雅风教授热情指导下完成,特致衷心感谢。

密度仅是当雪深等于和大于 5cm 时,在部分台站每候观测一次。冬季雪贮量无法根据每个台站雪层水当量来确定,本文用平均积雪深度和平均积雪密度来估算。

我国季节积雪密度主要受积雪持续时间和含水量所制约。在稳定积雪区、包括东北、内蒙区、北疆天山区和青藏高原区,为 150—160kg/m³,西北干旱半干旱地区,临时积雪密度最小,平均为 110kg/m³,南方临时雪盖密度最大,在 200kg/m³ 上下。全国平均为 160kg/m³。

表中给出了全国和各省、区积雪资源计算结果。全国季节积雪年平均补给量为 3451.8 × 10⁸m³。换言之,年平均降雪量为 36.0mm,占年降水量的 5.7%,与 Hoinkes H. (1967 年)所估算的全球陆地降雪量占降水量 5% 的结论接近^[1]。全国冬季平均积雪贮量为 535.6 × 10⁸m³,平均积雪深 3.5cm。西藏自治区降雪量最多,达 75.2mm/a,这是因为

中国各省、区雪资源贮量表
Snow resources of all the provinces of China

雪 资 源 省 份	年降雪量 (mm)	年补给量 (10 ⁸ m ³)	平均积雪深 (cm)	冬季雪贮量 (10 ⁸ m ³)
黑 龙 江	50.4	231.8	6.4	47.1
吉 林	68.5	123.3	5.3	15.3
辽 宁	41.3	62.0	3.6	8.6
内 蒙 古	30.2	332.2	3.1	51.2
新 疆	35.1	560.8	7.1	181.8
西 藏	75.2	902.4	3.3	71.3
青 海	39.1	281.5	1.8	22.0
甘 肃	25.4	99.1	2.3	13.4
宁 夏	20.2	13.3	2.3	1.7
陕 西	36.9	70.1	2.7	7.7
山 东	25.1	37.7	3.2	7.2
山 西	37.6	56.4	3.6	8.6
河 北*	27.4	59.7	3.5	11.5
河 南	29.1	46.6	3.7	10.0
安 徽	30.7	39.9	4.7	10.4
江 苏*	32.3	34.2	3.7	6.3
浙 江	51.7	51.7	5.1	8.7
江 西	38.1	61.0	3.7	11.8
湖 北	45.7	82.3	3.5	12.6
湖 南	42.2	88.6	3.1	12.4
四 川	28.5	159.6	0.9	7.6
云 南*	25.9	46.6	1.3	3.8
贵 州	15.5	11.0	1.7	4.6
广 西	微	微	0	0
广 东	微	微	0	0
福 建	微	微	0	0
台 湾	微	微	0	0
全 国	36.0	3451.8	3.5	535.6

* 河北包括天津市、北京市的资料;江苏包括上海市的资料;云南不包括无积雪地区。

该地区降雪期最长,降雪量占降水量的比例最高。吉林省次之、宁夏、甘肃、山东较少。新疆自治区冬季雪贮量最丰富,达 $181.8 \times 10^8 \text{m}^3$, 占全国 33.9%, 平均积雪深达 7.1cm。黑龙江省次之,宁夏、甘肃、青海较少。由于资料缺乏,春季融雪径流量、永久积雪贮量和补给量未加估算。

二、季节积雪资源时空分布

1. 地理分布特征和区域分异趋势 近百年来,大气中 CO_2 含量的不断增加引起的积雪分布的变化是导致全球气候环境变化的重要方面。这一变化可能首先并明显地表现在中纬度地区。我国地处这一变化的敏感地区,积雪资源分布特征对 CO_2 导致的积雪变化的地区差别具有一定的诊断价值。

图 1 和图 2 分别给出了全国年平均降雪量和冬季平均积雪深度的地理分布。可以看出,我国雪资源分布范围非常广泛,仅福建、广东、广西、台湾四省区和云南省大部分地区无积雪资源存在。但是积雪数量并不丰富,绝大部分地区年降雪量在 50mm 以下,平均积雪深度不足 5cm。20mm 年降雪量和 3cm 积雪深所占面积最大(图 3 和图 4)。全国年平均降雪量尚低于全球陆面年平均降雪量(40mm)。雪资源分布最显著的特征是地区分布极不平衡,高度集中在西部和北部山地。占全国面积不足 10% 的山地集中了雪补给量和贮存量的一半以上,年降雪量在 100mm 以上,平均积雪深度在 10cm 以上。特别值得注意的是,北方广大地区雪资源数量相当贫乏。沿 40°N 的干旱半干旱区,面积占全国 16% 以上,雪补给量仅为全国的 4.8%, 中心地带年降雪量在 5mm 以下,积雪深不足 1cm。就是东北平原,中部和西部平均积雪深也仅有 2—3cm。黄河流域雪资源数量不及长江流域。前者年降雪量平均 28.8mm,积雪深 2—3cm,低于全国平均值;后者分别为 38.5mm 和 4—5cm 以上,高于全国平均值。长江下游为相对多雪区,浙江省年平均降雪量多达 51.7mm;黄河下游为相对少雪区,河北省年平均降雪量仅有 27.4mm,山东仅 25.1mm。

上述地理分布特征清楚地反映出了我国积雪资源三种明显的区域分异倾向。一是温度分异,由中纬度到低纬度、季节积雪资源地区和无积雪资源地区成带状排列。二是高度分异,由低地到高山、无积雪资源地区、季节积雪资源北区和永久积雪资源地区呈垂直地带性分布,并形成了高山与低地间积雪资源两极化分布形势。三是温度分异,北方干燥地区相对少雪、南方湿润地区相对多雪。我国降雪主要由于冷空气入侵形式,本地区空气中的水汽是形成降雪的主要水汽来源。因此, CO_2 增温效应所导致的积雪变化必将使我国高山与低地(盆地)间、干燥区与湿润区之间积雪资源不平衡分布进一步加剧。积雪区的北移和上升,积雪日数的减少必将导致土壤显著干旱化。因此,北方低地干旱化的发展,干旱区、半干旱区的进一步扩大,将成为 CO_2 所导致的我国气候环境变化中的最严重的后果。

2. 季节分配特点与时间分布的不稳定性 我国降雪补给量的季节分配受降水和气温年变化过程二者所制约。全国降雪量年内分配不是集中在最冷月份,而是在秋、春与冬季交替时期(图 5)。只是高山冰川作用区例外,那里降雪集中在夏季(图 6)。最冷月份降雪量的减少在极高山地区、青藏高原(图 7)以及最北部省份最明显。南方省份则不然,降

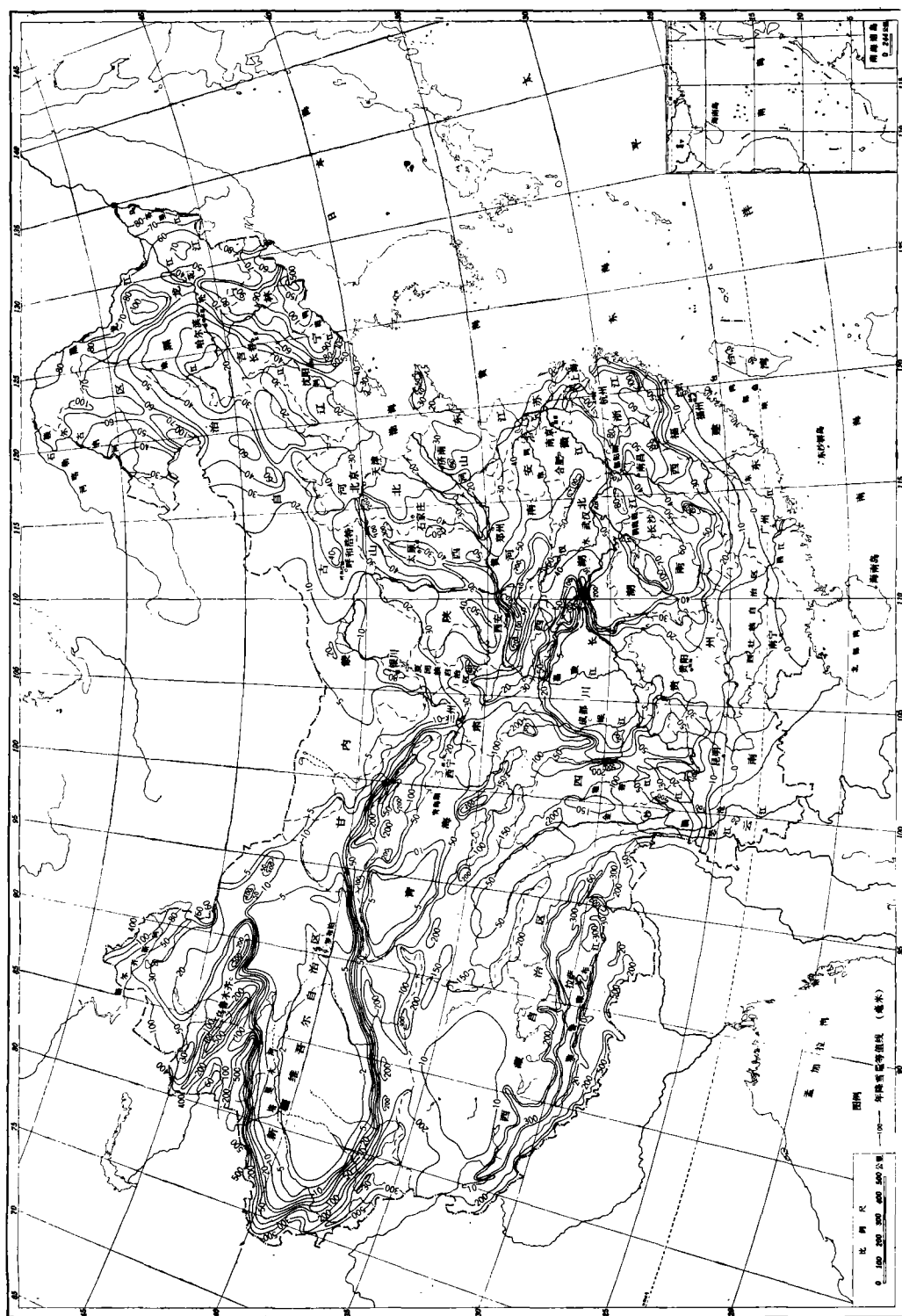


图1 中国年平均降雪量(1951—1980年)
Fig.1 Mean annual snowfall amount in China (1951—1980)

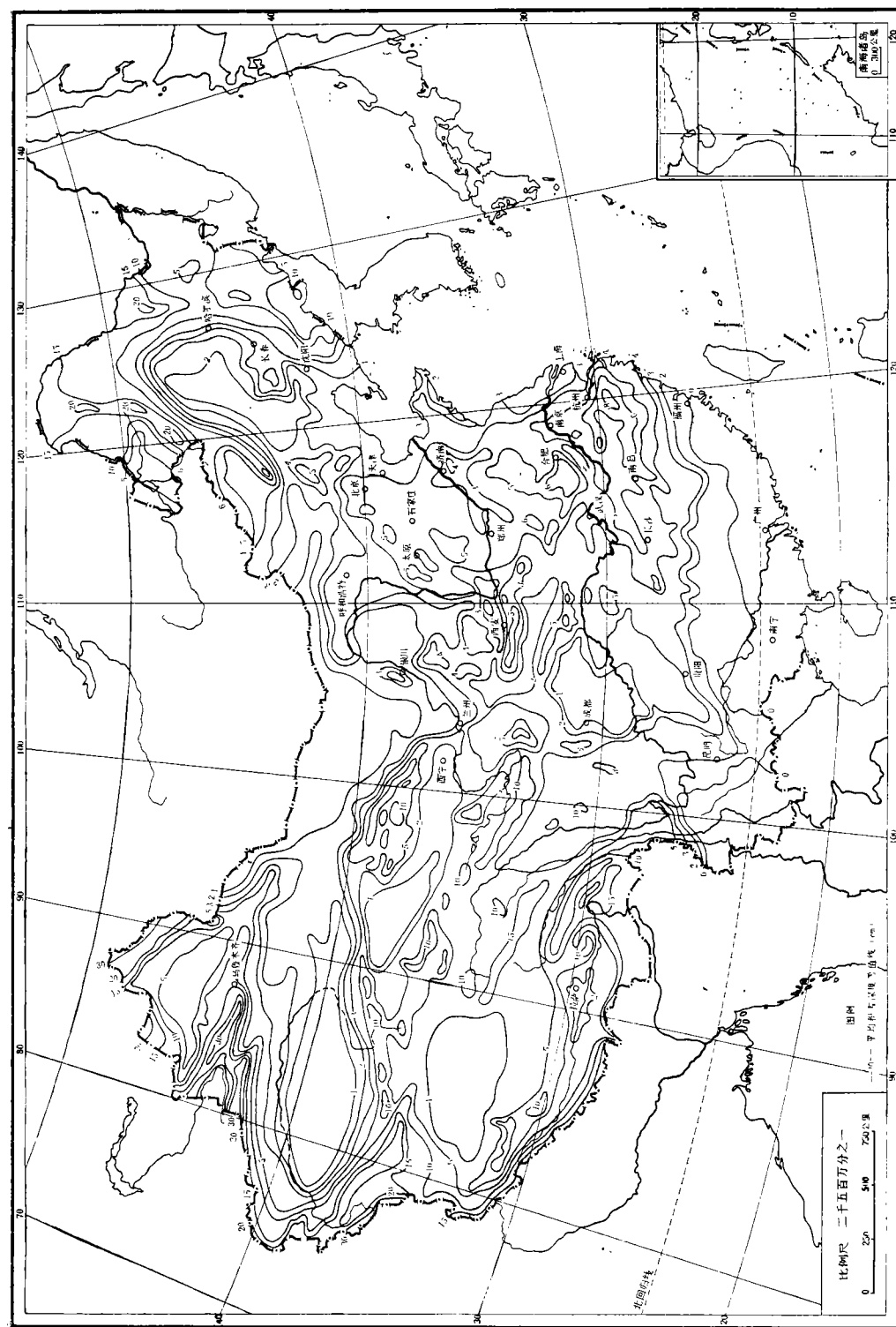


图 2 中国平均积雪深度 (1951—1980 年)

Fig.2 Mean daily depth of snow cover in China (1951—1980)

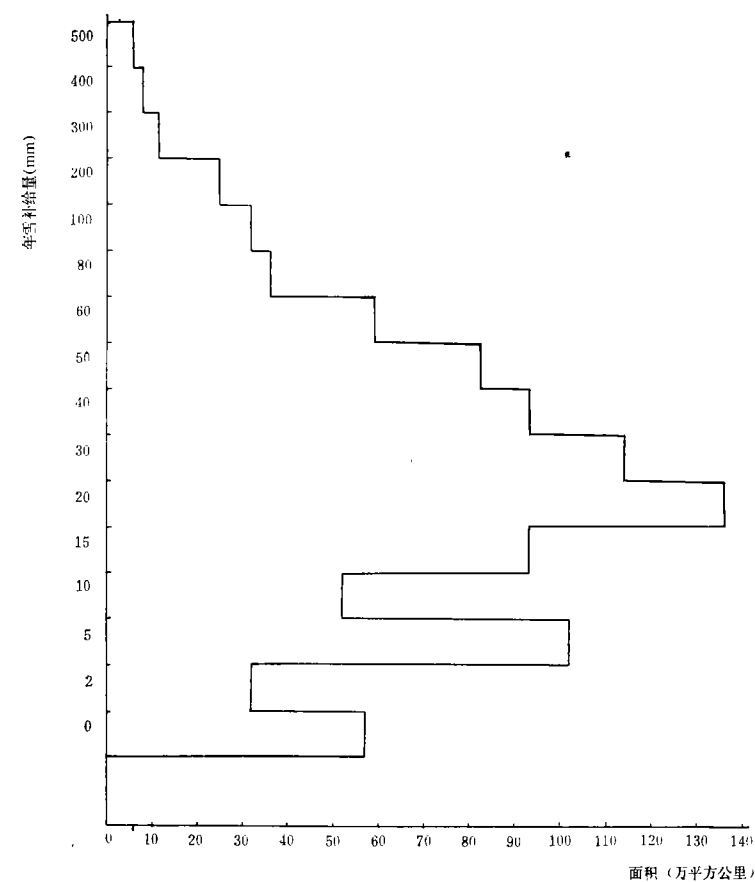


图3 中国年平均降雪量面积分布

Fig.3 Area-mean annual snowfall amount distributions of China

雪集中在二月份。各地峰值降雪期随时间由北向南推进,十月份在黑龙江、内蒙古、新疆三省区北部,以及青藏高原。十一月份到达华北、西北,一、二月份在长江流域。

积雪贮量与降雪补给量有别,主要受气温控制,大部份地区集中在最冷月份(图5)。其中东北地区元月份积雪量最多,其它地区二月份最多。但青藏高原和极高山地区主要受降雪支配,和降雪一样集中在秋、春两季(图6、7)。全国积雪贮量的年内分配,几乎被黑龙江、新疆、吉林以及内蒙古北部积雪所左右。

积雪贮量另一个特点是它的变化不稳定性。除黑龙江、新疆、内蒙古三省区的北部,吉林东部以及某些高山地区外,其余大部分地区雪层很薄,持续时间不长,即使在负温下也很快消失。没有稳定的积累期与消融期,致使雪贮量远小于补给量。二者相差程度各地区不同,以青藏高原最高,达12.8倍;新疆、黑龙江最低,为2.9—4.9倍。全国平均相差6倍以上。说明大部分地区雪贮存条件不良。

上述雪资源时间分布特点决定了我国大部份地区雪贮量和南方降雪量对温度变化将十分敏感。 CO_2 增温效应将导致这些地区雪贮量的减少。但高山地区、青藏高原地区以

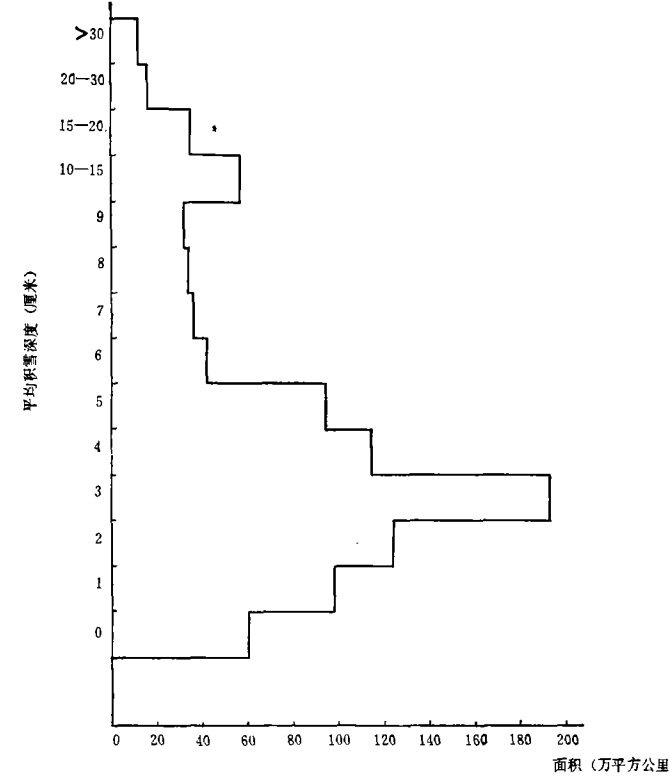


图4 中国平均积雪深度面积分布
Fig.4 Area-mean daily depth of snow cover distributions of China

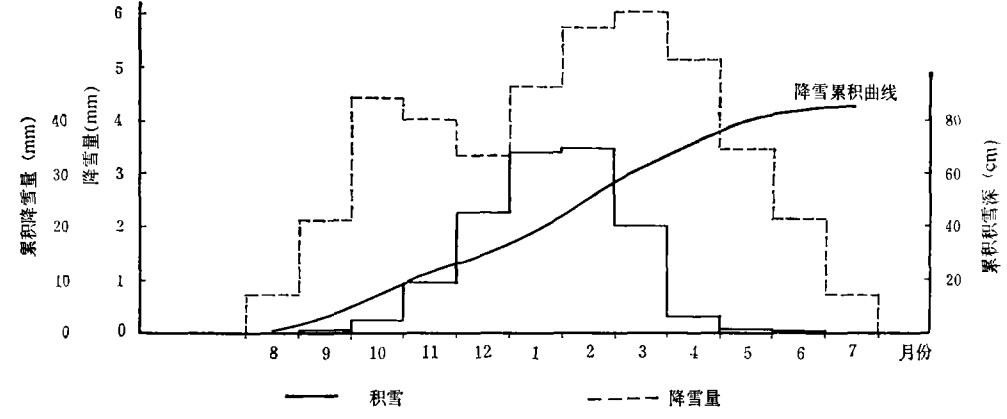


图5 中国雪资源的逐月分配 (1951—1980 年)
Fig.5 The mean monthly distributions of snow resources in China based on the (1951—1980) period

及最北部省份,降雪对气温的依赖性不强,积雪贮量抗 CO₂ 增温的稳定性较强。 尽管如此,如何改善北方,尤其是低地积雪贮存条件,防止 CO₂ 增温可能导致的土壤显著干旱

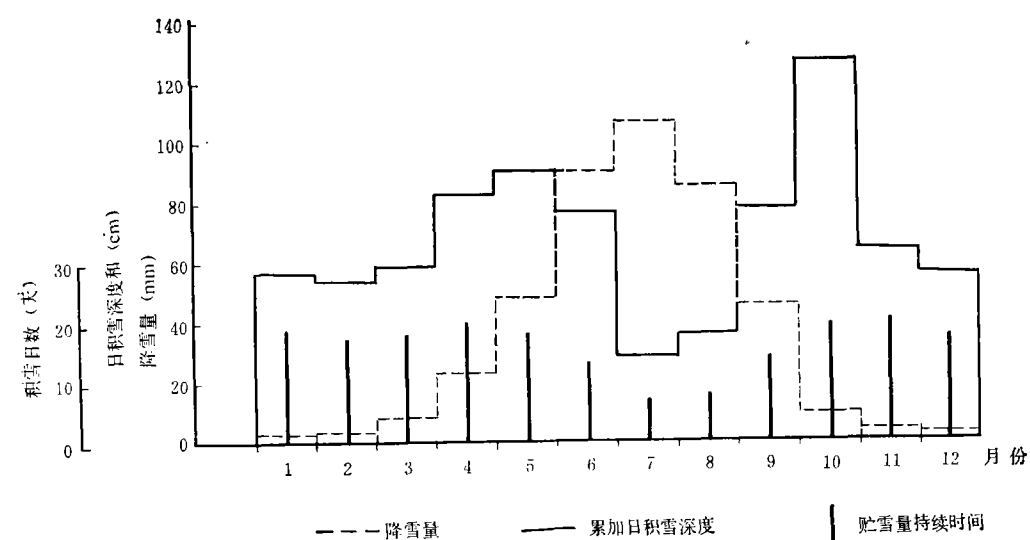


图6 天山站(43°06'N, 86°50'E; 海拔高度 3539.0m) 降雪量与积雪贮量的逐月分配 (1958—1980 年)

Fig.6 The mean monthly distribution of snowfall and snow storage for Tian Shan station (43°06'N; 86°50'E; 3539.0ma.s.l.) based on the (1958—1980) period

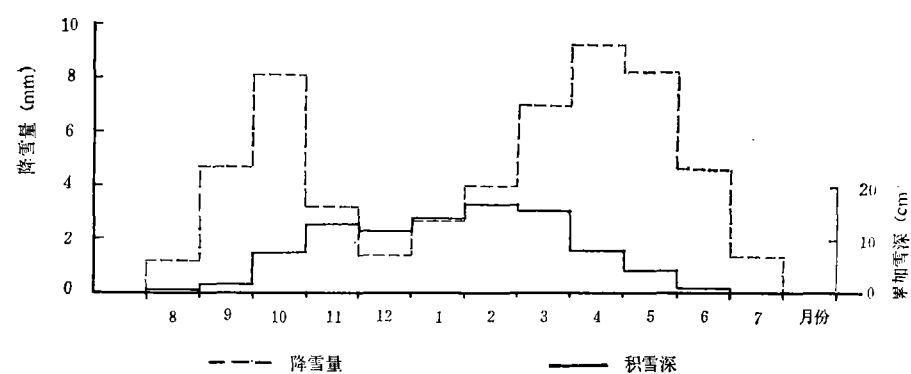


图7 青藏高原雪资源的逐月分配 (1951—1980 年)

Fig.7 The mean monthly distributions of snow resources for Qinghai Xizang Plateau based on the (1951—1980) period

化^[2],是值得引起注意的问题。

三、年际波动与变化趋势

地区性雪资源的年际波动是天气尺度环流异常的结果。我国位于大陆积雪过渡带的南缘,又是季风大陆性气候,故地区性雪的年际波动十分显著。尤其是非年周期性积雪区。但是,全国雪资源总数量却具有一定的稳定性。年降雪补给量最大值为 $4600 \times 10^8 \text{m}^3$,

最小值为 $2560 \times 10^8 \text{m}^3$, 相对变幅 59.1%。降雪补给量保证率曲线符合皮尔逊 III 型曲线 (图 8)。冬季雪贮量若以累积雪深表示, 最大为 312cm, 最小为 139cm, 相对变幅 85.6%。各地区年变化远大于全国平均值。以积雪较稳定的黑龙江省为例, 年补给量和贮存量的相对变幅分别为 121.6% 和 180.8%。年变率最大的地区是戈壁沙漠, C_v 值在 1.0—2.0 以上。塔里木盆地数年无雪, 最多雪的冬季比吉林省多, 年平均值还高。内蒙古西部地区最多雪的年份, 日积雪深度和, 占其 25 年总和的 88%。

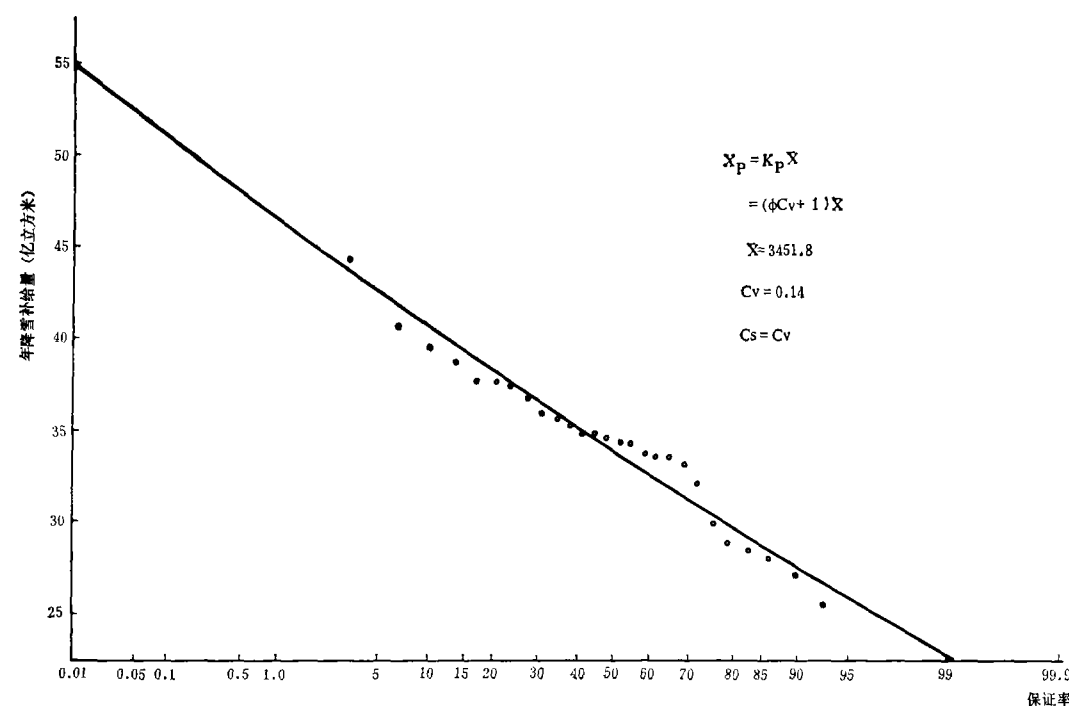


图 8 全国年降雪补给量保证率曲线

Fig.8 Probability curve of annual snowfall amount over China

雪资源时间序列是监测和预测气候环境变化的手段, 是多维气候模式中关键的输入和输出变量, 也是检验许多气候模式的依据。图 9 给出了全国季节雪年补给量和冬季累积贮量的长期变化。可以看出, 在过去的三十年中, 出现了两个正距平时期: 1954/1955 年—1957/1958 年和 1967/1968 年—1972/1973 年两个负距平时期, 1958/1959 年—1966/1967 年和 1973/1974 年—1975/1976 年。补给量和贮存量二者皆于 1956/1957 年冬和 1977/1978 年冬达高峰值。此外, 1963/1964 年, 1968/1969 年, 1972/1973 年冬也是丰雪年。相反, 1973/1974 年, 1962/1963 年和 1964/1965 年为枯雪冬季。有的冬季全国普遍多雪或普遍少雪, 有的冬季仅北部和西部多雪或者仅南部和西部少雪。各地区最大丰雪年或极端枯雪年并非同时出现, 但变化的总趋势全国基本一致。只有新疆变化相位与其它地区不大协调, 高山地区与平原地区变化相位往往不一致。

把图 9 与北半球大陆积雪进退^[3,4], 海面升降变化^[5]以及南方涛动指数曲线^[6]相对比, 我们发现, 我国雪资源的波动是全球海气异常的结果。多雪冬季的出现与厄尔尼诺——

南方涛动的出现相同步,它与北半球大陆积雪进退以及我国海面升降活动相一致。

近百年来, CO_2 增温导致了本世纪温暖时期的出现和“小冰期”的结束,全球平均气温升高 0.5°C ^[7],接着由于火山喷发以及极地冰雪的反馈作用形成了六十年代波动性降温,干扰了 CO_2 持续增温的趋势,我国雪资源十年滑动平均(图10)准确地反映了全球温度的变化。它表明,我国雪量的变化趋势与全球气温的变化有密切关系,二者变化趋势成正相关。尽管 CO_2 增温会引起北方低地(盆地)和南方降雪量与积雪量减少,但全国雪资源总量在现阶段将是增加的。全球平均气温每升高 0.1°C ,降雪量将增加 5.2% ,积雪量增

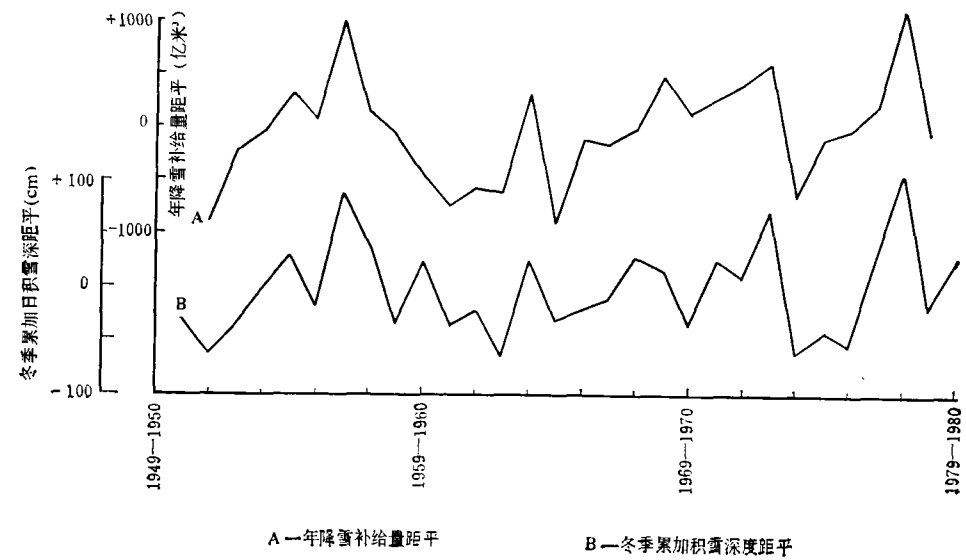


图9 中国雪资源的逐年波动

Fig.9 Year to year fluctuations of snow resources in China

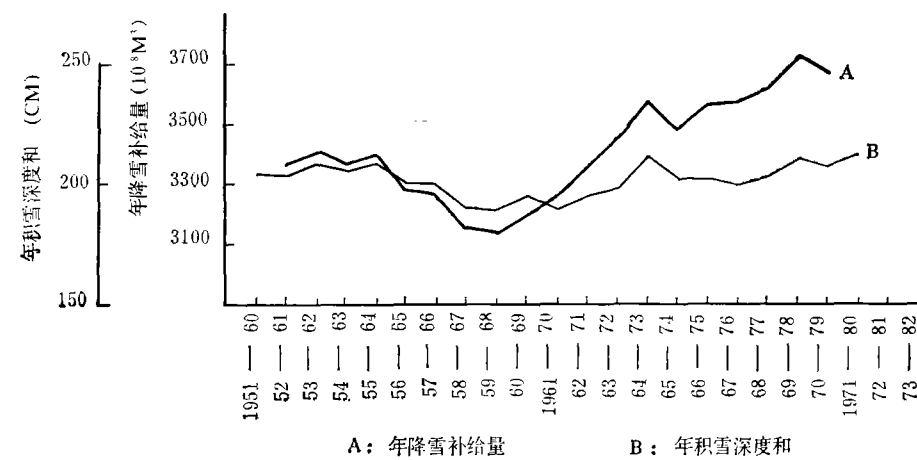


图10 中国雪资源十年滑动平均

Fig.10 Mean snowfall and snow storage over 10 year running in China

加 3.7%。主要增加的地区是西部和北部山区。

四、综合评价

1. 降雪是我国西部和北部山区以及青藏高原大气降水的主要形式之一。冬季积雪贮量是我国重要的淡水资源。其数量虽然不够丰富,但仍然是很可观的。年平均降雪补给量为我国冰川融水年总量的六倍以上,相当于地下水年动态贮量的 43%,淡水湖蓄水总量的 1.6 倍。它对我国北方农牧业的发展具有重要意义,也是西部寒区和干旱区经济开发的一个主要限制性因子。

2. 全国积雪资源总量具有一定的稳定性,其季节分配的特点也有利于春耕时节土壤蓄水保墒,为西北干旱区和东北地区春季灌溉用水提供了一定的保证。这对克服北方春旱灾害十分有利。因此,它与北方农业收成有密切关系。三十年中雪资源的两个正、负距平时期与农田受旱面积的两个明显的低、高值时期基本吻合^[8]。另一方面,地区性特大暴风雪也给青藏、内蒙古、新疆等地区的牧畜业带来严重危害。早春寒潮大雪造成长江流域作物冻害,枯雪又往往引起北方春旱,而山区异常积雪酿成洪水泛滥成灾。

3. CO₂ 增温引起的季节积雪的变化将使北方低地(盆地)雪资源数量的减少。积雪区的北移或升高,积雪日数的减少必将导致中纬度不稳定积雪区土壤显著干旱化。对此必须采取对策,但全国雪总量,主要是西部与北部山区的雪资源数量将有所增加。积极保护,合理开发利用山区积雪资源会显得越来越重要。

参 考 文 献

- [1] Hoinkes, H., *Iash Publ.* (79), 7—16, 1967.
- [2] Schlesinger, M.E., Snow watch' 85GD-18, World Data Center for Glaciology, 249—270, 1986.
- [3] Kukla, G., J. Gavin, *Iahs-aish Publ.* (126), 249—258, 1980.
- [4] Barry, R.G., Glaciers, Ice Sheets, and Sea Level: Effect of A CO₂-Induced Climatic Change, United States Department of Energy, 241—247, 1985.
- [5] 杨怀仁等,地理学报, **39**(1), 1984。
- [6] Rasmusson, E.M., *American Scientist*, **73**, 168—177, 1985.
- [7] Hansen, J., *Science*, 873—875, 220, 1983.
- [8] 沈振泉,科学研究论文集,第14集(水资源), 43—55, 水利出版社, 1984。

PRELIMINARY EVALUATION OF SEASONAL SNOW RESOURCES IN CHINA

Li Peiji

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

Key words Seasonal snow resources; Annual snowfall recharge; Winter snow water storage; Geographic distribution of snow resources; Monthly distribution of snow resources; Secular variations of snow resources

Abstract

Based on data on daily depth and density of snowcover and snowfall recorded at more than 2300 weather stations of China from 1951 up to 1980, the snow resources have been evaluated and their secular variations have been clarified.

The mean annual snowfall recharge is $3451.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, where as the mean winter snow water storage is found to be $535.6 \times 10^8 \text{ m}^3$. Snow resources display the following characteristics: small yet important amount, uneven regional distribution, prominent seasonal and inter-annual variations, changeable storage and monthly distribution being contrary to the coldest months on the Tibet an plateau as well as in high mountains.

The geographical distribution of snow resources has shown the trend of regional differentiation between high mountains and low lands as well as between moist and arid areas. The CO_2 -induced changes in seasonal snow cover will aggravate the uneven opposing regional distributions. Changeable snow storage implies a considerable desiccation of the soil in the northern part of China in the CO_2 -enriched world.

The time series of snow resources reveal that they are consistent with the sea-level changes as well as area variations of farmlands which suffer from droughts in China. It can be seen that a synchronous relation exists between a global pattern of oceanic and atmospheric anomalies and snow fluctuations. The heavier snow appears to be associated with the EL Nino-Southern Oscillation. It is also noticeable that the snow resources are positively correlated with the global mean temperature and their trends have exactly shown a warm period which induced by a projected CO_2 -warming as well as a colder period in the 1960's which interrupted the twentieth century warming partly due to the resumption of volcanic activity.