

文章编号: 1000-0240(2009)04-0679-09

高山多年冻土分布模型与制图研究进展

李静^{1,2}, 盛煜¹, 焦士兴^{1,3}

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455002;

3. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 人类活动及各种工程措施的实施加速了高山多年冻土领域的相关研究, 多年冻土的分布与制图成为该领域的研究热点之一。对该领域内的冻土勘察方法、冻土模型的建立、冻土分布模拟与制图等国内外研究现状进行了回顾和总结, 高山多年冻土模型无论是经验统计模型, 还是过程模型, 都是基于对实地高山多年冻土分布状况的一种近似模拟, 因而, 或多或少的存在一定的误差, 模型的好坏在于所绘制的高山多年冻土图与冻土实际分布状况的吻合程度。从各种高山冻土模型与制图的发展过程来看, 高山多年冻土模型与制图的未来研究呈现出多元化研究和细化研究的趋势。

关键词: 高山多年冻土; 分布模型; 冻土制图; 研究进展

中图分类号: P642.14 **文献标识码:** A

0 引言

高山多年冻土 (alpine permafrost) 泛指形成于高山、高海拔等高寒环境条件下的冻土, 既包括中低纬度的高山、高海拔多年冻土, 也包括极地高山冻土^[1]。自“高山多年冻土”的概念以来, 有关高山多年冻土分布范围、下界、分类等的相关研究日益增多^[2-6]。

我国高山/高海拔多年冻土分布面积达 $173.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国多年冻土面积的 80.6%, 占北半球高海拔多年冻土分布面积的 74.5%^[7]。青藏高原、喜马拉雅山、天山、昆仑山等地均有分布且类型多样^[6]。20世纪70年代以后, 国际上有关高山多年冻土的分类方案日渐成熟, 以连续、不连续、岛状等平面分布的连续性作为高山冻土分带指标的分类方案成为主流, 但我国学者程国栋等^[7-8]认为这些分类方案均不能很好地反映出高海拔多年冻土分布的特点。因此, 在总结世界各地高海拔多年冻土资料的基础上, 提出高海拔多年冻土分布的“三向地带性”特征和以年均地温作为高海拔多年冻土

分带的主要指标, 根据年均地温值的大小, 将高海拔多年冻土分为稳定、不稳定和过渡等类型^[8]。与此同时, 高山多年冻土分布下界也成为该领域研究的重点之一。王家澄^[6]定性分析了北半球高山多年冻土与纬度、年均气温间的关系; 程国栋^[8]提出我国高海拔多年冻土分布下界与地理纬度的高斯模型。这些针对高山、高海拔地区多年冻土类型和分布的研究仅涉及纬度、高程 (年均气温) 等地带性因素对高山多年冻土的影响, 由此进行的高山多年冻土制图多是小比例尺冻土分布图。

事实上, 在山区, 由于地形的异常复杂性和植被、积雪、岩性、地表水分等局地因素的作用使得基于地带性规律的小比例尺多年冻土图远不能满足实践的需要。20世纪90年代以后, 针对各种局地因素对高山多年冻土影响的研究, 以及建立局地因素作用下的区域冻土分布模型与大比例尺的高山冻土模拟制图的研究日益增多^[9-10]。本文就国内外近年来高山多年冻土区的冻土勘察、分布模型与制图等研究现状进行综述, 并对该领域的发展趋势进行总结。

收稿日期: 2008-11-26; 修订日期: 2009-01-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2007CB411502); 国家自然科学基金项目(40871040)资助

作者简介: 李静(1979—), 女, 山西长治人, 2005年在中山大学获硕士学位, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在职博士生, 主要从事冻土模型与制图方面的研究。E-mail: li_jing9797@lzb.ac.cn

1 高山冻土勘察方法

钻孔及地温测量是确定多年冻土存在与否的最直接方法^[11-14]，但是在高山地区，特殊的地形地貌和局地环境引起的可达性问题和钻孔测量的费用问题都成为该方法在高山地区广泛使用的制约条件。因此，经验方法、物探方法、遥感技术等各种方法不断被提出和改善用以国内外高山多年冻土的调查。

1.1 高山冻土勘察方法现状

1.1.1 经验方法

在阿尔卑斯山等具有良好积雪条件的地区，“雪底温度法 (Bottom Temperature of Snow, BTS)”成为高山多年冻土调查的经验方法^[15]。该方法由 Haeberli 在 1973 年研究瑞士东部阿尔卑斯山的多年冻土分布时提出，其主要依据是该地区良好的积雪条件和冬季积雪对地面的保温作用。由于厚的积雪对地表形成的隔离作用使得冬季地表温度可以不受气温、辐射等气候因子短期变化的影响而保持相对稳定，因此，可以以积雪底面与地表的接触面温度 (BTS) 作为地温的近似替代值，据此推断多年冻土的存在与否。BTS 值的测量相对容易，将探针穿过积雪插入地表，借助于万用表获得电阻值进而转化为温度值^[12]。BTS 法以其可测量性、易操作性和定量化的结果等优势在高山冻土勘探中得到了广泛应用，成为阿尔卑斯山地区高山冻土勘探的经典方法^[15-17]，也被应用于斯堪的纳维亚地区^[18-19]、加拿大^[20]、日本^[21]、西班牙^[22]、波兰^[23]等地高山冻土的野外实地勘探中。

在我国，由于气候干燥难以形成长期稳定的积雪，因此 BTS 方法的应用较少，确定高山冻土存在与否的经验方法是“景观指示法”或“地段指示法”^[24]，即根据植被、冰缘地貌、土壤表层含水量等地表特征及其组合，依靠经验判断高山多年冻土的有无及其分布下限。

1.1.2 地球物理勘探方法

冻土在冻结和未冻结状态的相变过程中存在着大量的物理参数的变化，这为利用各种物探方法检测和识别冻土特性提供了可能。国内外冻土物探方法种类繁多，在不同的时期主流方法各不相同。

国外高山冻土的物探检测大致可以分为 3 个时期：早期，以折射地震波和一维直流电阻率测深为主的时期，多用以检测地下冰和判断各种高山冻土的特性^[25-26]；之后，重力测定^[27]、探地雷达^[28]、

辐射测量技术^[29]和电磁感应^[30]等方法在高山冻土实地勘探中的应用，进一步完善了国外高山冻土勘察中所采用的物探技术和方法；近年来，数据获取和物探反演技术的发展促进了二维直流电阻率测深法在高山冻土物探中的应用，该方法可以更加详细地了解地面以下物质的结构和属性^[31-33]。

黄以职等^[34]、俞祁浩^[35]、王文龙等^[36]先后对我国冻土物探的发展进行研究，将物探技术在我国多年冻土检测中的应用分为三个时期，即 1960 年代初以直流电应用为主的直流电法时期，1960 - 1980 年代以直流电测深法、直流电剖面法、偶极电位差比较法、中子测井、地震勘探法等为主的应用时期，以及 1990 年代以后以探地雷达应用为主的时期。

Kneisel^[37]、Hauck 等^[38]对各种高山冻土物探方法的适用性进行评价，指出随着多电极电阻系统和二维直流电阻率测深剖面反演技术的发展，二维直流电阻率测深法成为高山冻土勘探中的最适用方法。

1.1.3 遥感勘察方法

随着遥感技术的发展，借助高分辨率遥感影像和航空影像调查多年冻土指示特征的方法日益成熟和发展。但是遥感方法并不能检测冻土本身的存在及分布状况，而必须借助与冻土存在相关的地貌指示因子或属性特征间接推测冻土的存在和分布，石冰川、热融滑塌、多边形地面等冰缘地貌，以及植被、积雪、岩性地表属性特征就成为高山冻土遥感勘察的主要对象和内容^[10, 39-41]。

1.2 高山冻土勘察方法述评

总的来看，各种基于经验的、借助物探和遥感技术的高山冻土勘察方法各有侧重。

基于 BTS 值的经验方法简单实用，易于推广，但直接受限于积雪厚度的年际变化，存在一定的不确定性和模糊性；“景观指示法”或“地段指示法”等经验方法只能判断冻土的有无及大致的分布下限，其结果多以定性为主、不确定性和模糊性较大，而且对经验的依赖较强，不适合精确的冻土建模和制图使用。

借助冻土物探的高山冻土调查方法不仅可以判断冻土的存在与否，而且可以判断地下冰的存在，以及冻土含冰量等冻土特性，因此成为高山冻土野外勘探的主要手段^[37-38]。但是各种物探方法的应用都必须具备特定的条件，如折射地震法的实施要求地表松软^[36]，直流电阻率法获得的电阻率模型

比较模糊、模型的解释强烈依赖于获取数据的质量、反演参数的选取等^[38], 这些特定的条件一定程度上限制着冻土物探方法的推广应用。

遥感技术以其高分辨率和大面积勘察的优势在近年来的冻土勘察中呈现迅速发展的趋势, 特别适宜于高山复杂地形区的地表属性特征变化的监测。但是这种间接测量的方法只适宜作为钻孔等直接测量方法的有益补充, 在实践中会发挥较大的作用。

总的来说, 单一的冻土勘察方法或多或少的存在缺陷, 从而影响了冻土勘察的精确性。随着高山多年冻土领域各项研究的发展, 各种冻土勘察方法的综合使用成为高山冻土分布研究的主要趋势^[42-44], 也成为高山多年冻土分布模型和制图的主要数据来源。

2 高山多年冻土模型与制图

高山多年冻土的形成与分布除受纬度、经度、高程等区域性地带因素和大的冷气候影响之外, 坡向、坡度、植被、积雪等局地因素对局地多年冻土的形成和分布也至关重要, 主要表现为复杂地形和微气候的影响下, 高山多年冻土分布的连续性被破坏, 表现出不连续分布和零星岛状的分布形式。

2.1 高山多年冻土模型的尺度与制图

根据高山多年冻土形成与分布的影响因素, Etzel Müller 等^[9-10]将高山多年冻土分布模型分为微观尺度(micro- or patch-scale)、中观尺度(meso-scale)、宏观尺度(macro-scale) 3 个尺度。

在宏观尺度研究范围内, 局地因素的影响力逐渐减弱, 纬度与海拔条件决定的年均气温、地质条件控制的地热流等宏观因素成为影响高山冻土存在与分布的主要因素。因此, 在大的研究尺度上, 纬度、高程、年均气温是确定高山冻土下界与进行高山冻土制图的主要依据。如前所述, 王家澄^[6]和程国栋^[8]分别研究了北半球高山多年冻土下界高度与纬度、年均气温的关系, 国外诸多学者分别探讨了日本富士山、尼泊尔喜马拉雅山东部、北美落基山以及欧洲阿尔卑斯山多年冻土下界与年均气温的关系^[6]。李新^[45]和南卓铜^[46]分别运用高斯曲线模拟了青藏高原多年冻土的分布状况, 并绘制高原多年冻土图。在斯堪的纳维亚半岛, King^[4]和 Ødegård 等^[18]研究了 BTS 值与年均气温(MAAT)之间的关系, 建立起二者之间的经验模型, 认为 $MAAT = -4$ 为区域不连续冻土分布的下界, 并据此做该区域的高山冻土分布图。在挪威南部阿尔卑斯山的

Dovrefjell and Jotunheimen 地区, Ødegård 等^[18]和 Isaksen 等^[19]统计上建立了 BTS 值与高程之间的函数关系, 并用该函数模拟区域冻土分布状况。

在中观尺度研究范围内, 宏观因素对高山多年冻土形成与分布的制约作用逐渐减弱, 坡度、坡向等地形因素及其影响下的太阳辐射、积雪、植被等局地因素成为影响高山多年冻土形成和分布的主要因素。Kneisel 等^[47]探讨了瑞士东部阿尔卑斯山的局地高山冻土分布特征; Gude 等^[48]研究了欧洲中部 Harz 和 Bohemian 山区数个斜坡岩屑堆环境下发育的高山冻土特性; Asunci ón 等^[22]对欧洲高山冻土形成与分布的局地环境进行总结指出, 多数情况下, 特殊的地形条件如北坡、荫蔽环境等导致太阳入射辐射减少, 造成冻土甚至可能存在于年均气温高于 0 的地方。王绍令等^[49]通过实地观测资料研究了局地因素(植被、积雪、岩性、含水量、坡向、建筑材料等)对青藏高原近地表层地温及高原冻土分布的影响; 程国栋^[50]分析了由局地因素影响造成的高原多年冻土“异常”分布的众多实例。因此, 更为详细的高山多年冻土制图要求深入了解局地因素对多年冻土形成与分布的影响, 以及建立考虑局地因素的高山冻土模型。

在微观尺度上, 冻土是一种热现象, 是地-气系统热交换的产物。对具体地点高山冻土环境的研究可以从详细的热量交换和地-气相互作用机制的角度展开, 考虑局地因素引起的热交换和各种辐射通量的空间变化, 如 Stocker-Mittaz 等^[51]提出的高山冻土过程模型。

高山多年冻土模型的另一种尺度分类是根据空间分辨率进行划分, 一般情况下, 微观尺度模型的空间分辨率 < 25 m, 中观尺度模型的空间分辨率介于 25 ~ 250 m 之间, 而宏观尺度模型的空间分辨率则 > 250 m。此外, 多年冻土模型还具有时间尺度。从时间尺度上来看, 冻土具有对气候变化的滞后效应, 人们今天所见到的冻土状态是过去气候条件的产物, 也影响着未来气候和冻土的发展, 但目前众多的模型均没有考虑时间因素的影响。

高山多年冻土模型的尺度研究, 主要目的是建立一系列不同等级、规模和复杂程度的冻土分布模型, 用以解决不同的问题、处理不同类型和级别的数据。事实上, 强烈的地形变化, 以及地形因子对多年冻土形成与分布的主导作用决定了只有中观和微观尺度的模型适合于复杂山区的冻土分布模拟与制图。

2.2 高山多年冻土模型的类型与制图

Hoelzle 等^[9-10]将高山多年冻土模型分为经验-统计模型和过程模型,李新等^[52]着重探讨了冻土-气候关系模型,将其分为传统的冻土模型以及冻土对气候系统的响应模型和陆面过程中的参数化模型.本文就经验-统计模型和过程模型的发展状况作简要回顾.

2.2.1 经验-统计模型

经验-统计模型(empirical-statistical models)是高山多年冻土分布的经验判断与统计方法的结合,其实质是建立具体地点高山多年冻土的存在(通常是采用各种实测方法获得或证实)与周围环境影响因素之间的统计关系.这类模型的建立需要借助于冻土存在的指示变量,分析高程、气温、辐射、植被、岩性等局地影响因素对指示变量的影响,建立起主要影响因素与高山冻土存在的统计关系,再依据指示变量的经验值划分高山冻土的类型与绘制区域冻土图.现代计算机技术与 GIS 技术结合为各种经验-统计模型的建立提供了技术基础.

国内外常用的高山冻土指示变量有 BTS、冻土地温、石冰川冰缘地貌等^[53],主要来源于 BTS 测量、钻孔测量、冻土物探及遥感等勘察方法. Hoelzle^[16]深入研究了 BTS 与气候因子之间的关系,借助于 BTS 与 DEM 数据,建立起描述 BTS 与高程、潜在太阳辐射之间关系的 PERMAMAP 模型,用以模拟阿尔卑斯山东部地区的冻土分布状况,根据 BTS 经验值划分高山冻土类型并绘制区域冻土分布图. Gruber 等^[54]利用 BTS 实测值和遥感影像图,建立起 BTS 与高程、太阳辐射、植被覆盖度的统计模型,进行区域 BTS 值与多年冻土的模拟制图与类型划分. Antoni 等^[20]基于 BTS 值与 DEM 数据,建立起 BTS 与高程、太阳潜在入射辐射之间的统计模型,提出冻土分布的概率指数(Probability index),用以模拟加拿大 Yukon 地区高山冻土的分布状况,并编制该地区的高山冻土可能分布图. Julián 等^[22]借助历时 3 a 获得的 223 个 BTS 实测值,结合 DEM 数据,建立了 BTS 与 5 月潜在入射辐射和高程之间的二元线性回归模型,用以模拟西班牙 Pyrenees 中部地区的冻土分布状况,以及评价太阳辐射对中低海拔山区阴影遮蔽环境下冻土分布的重要影响.

吴青柏等^[55]通过青藏公路沿线实测年平均地温值,建立起青藏公路沿线年平均地温与海拔、纬度之间的多元统计回归模型,根据此模型对青藏公

路沿线冻土分布状况进行模拟与制图. Henry 等^[56]从冻土-气候系统的研究角度出发,在考虑局部地形和地表覆被状况对冻土分布影响的基础上,建立起联系地温和年均气温的冻土顶板温度(TTOP)模型,并将其应用于加拿大的冻土分布与制图.南卓铜等^[57]基于大量的钻孔温度值,建立了年平均地温与纬度、高程之间的统计模型,并用于青藏高原冻土分布的模拟与制图.李述训等^[58]应用多元线性回归分析方法,建立了青藏高原地温与月平均气温、地面温度与纬度、经度和海拔高度间的线性统计关系,用以模拟高原地温与冻土分布状况与制图.

早在 1978 年, Barsch^[59]就指出活动石冰川可以作为高山地区不连续冻土的指示物,崔之久^[60]也讨论了多年冻土的冰缘标志及冰川与冰缘作用的关系问题.根据 BTS 值所划分的 3 种冻土存在类型, Barsch^[61]根据含冰量将石冰川地貌相应地划分为 3 种类型,分别指示高山多年冻土的极可能、可能和不可能存在. Imhof^[17]根据航片解译和野外调查,对瑞士西部 Bernese Alps(伯尔尼兹山)山区石冰川类型及分布进行了编目,并利用活动和不活动两类石冰川地貌预测了该区多年冻土的分布状况,并用于编制区域冻土图. Frauenfelder 等^[62]结合地形-气候因子与区域生物地理特征,以石冰川等冰缘地貌作为指示变量,借助于 GIS 技术,建立了描述区域冻土存在的 PERMAMOD 模型,并用于瑞士阿尔卑斯山的区域冻土分布制图. Lambiel 等^[63]利用石冰川数据推测出瑞士西部阿尔卑斯山山区多年冻土过去和现在的分布范围; Janke^[64]以石冰川作为 Colorado 山区冻土分布的代理值,建立起石冰川与地形(高程、坡度、坡向)、地表覆被状况之间的统计函数,用于模拟区域冻土分布图.在国内,目前尚未见到以石冰川作为多年冻土的指示变量建立经验-统计模型的相关研究.

此外,基于影响高山冻土分布的多因素统计模型也被逐渐研究. Yoshikawa 等^[65]考虑高程、坡度、坡向等地形因子对高山冻土形成的影响,结合气温数据建立模拟阿拉斯加中部 Caribou-Poker Creeks Research Watershed(CPCRW)地区冻土分布的等效纬度-海拔模型,并据此绘制区域冻土分布图. Guglielmin 等^[66]考虑积雪、年均气温等气候因子对中纬度高山冻土环境的影响建立起模拟高山冻土分布的物理模型(PERMACLIM),根据此模型做意大利阿尔卑斯山中部 Passo del Foscagno 地

区的冻土分布图. Etzelm Üler 等^[67] 基于钻孔地温实测值, 建立起蒙古北部地形参数、地表覆盖参数与高山冻土存在之间的 f (favourability) 指数模型, 并结合 GIS 进行了该区的 f 指数模拟与高山冻土制图.

2.2.2 过程模型

过程模型 (process-oriented models) 是从高山冻土形成的地-气热交换过程入手, 考虑各种热交换过程及相应的热通量值对高山冻土形成与分布的影响. 当前, 比较成熟的过程模型是 PACE 项目支持下建立的 PERMEBAL 模型^[9-10, 51]. 模型主要包括能量平衡模型 (energy balance model) 和热偏移模型 (thermal offset model) 两部分. 其中, 能量平衡模型用以描述大气和地表之间的热量交换过程, 通过计算短波净辐射、长波入射辐射、扰动通量和雪的分佈等参数计算能量平衡模数. 在整个计算过程中, 需要输入大量的气象数据 (气温、气压、蒸汽压、风速、风向、云层、大气上界辐射、降水、全球日均辐射等)、地表特性数据 (反射率、粗糙度、发射率), 以及地形数据等. 最主要的数据源是 DEM, 模型的核心内容是积雪分布状况的模拟. 能量平衡模型的计算结果——表面温度作为热偏移模型的输入参数. 热偏移模型用以进一步描述年均地表温度和冻土顶板年均温度之间的差异, 主要考虑热偏移对地下温度的影响, 所以称之为热偏移模型. 从目前的发展状况来看, 能量平衡模型较为完善, 但热偏移模型还处于初步研究阶段. Hoelzle 等^[9]、Etzelm Üler 等^[10]、Catherine 等^[51] 分别阐述了能量平衡模型在瑞士阿尔卑斯山区 Corvatsch-Furtschellas 地区的应用及相应的地表温度模拟图.

2.3 高山多年冻土模型与制图述评

从国内外已有的高山多年冻土模型来看, 经验统计模型和过程模型各有优势和劣势. 各种经验统计模型忽略了复杂的冻土热交换过程, 将其视为一个灰盒子, 通过筛选影响高山多年冻土形成与分布的主要因素, 建立高山多年冻土的多因素经验统计模型, 在此基础上进行研究区域的高山多年冻土分布制图. 因此, 这类模型的建立较为简单. 除地形气候因子之外, 也考虑植被、岩性、积雪等局地因素对高山多年冻土形成与分布的影响. 但经验统计模型受地域条件的制约性较强, 不能进行时空上的外推, 而且由于各地区影响因素不同, 所建立的模型也各不相同, 因此, 地区之间的模型可移植性和可比较性就比较差.

过程模型着眼于微观, 侧重于大气和冻土之间各种热交换过程的理解, 通过将太阳辐射、地表反射率和地面热传导能力等指标参数化来建立模型, 因此, 这类模型可以有效识别决定高山多年冻土形成与分布的最重要因子. 但模型的建立涉及多项参数, 需要以大量的测量或计算数据为基础, 非常复杂. 但这类模型以地-气之间的能量交换过程为研究对象, 容易实现不同地区的模型移植, 因而能够进行时空上的外推, 特别适合于高山多年冻土对气候变化的敏感性研究.

高山多年冻土制图与模型研究密切相关, 受各种模型地域集中分布的影响, 高山多年冻土制图在地域上也表现出集中分布的特点. 国外高山多年冻土图基本上集中在阿尔卑斯山、斯堪的纳维亚等山区的局部或全部, 国内基本上集中于青藏高原. 相同地区的重复性工作较多, 而其它地区的相关研究又比较缺乏, 因此, 在今后的工作中应加强其它高山地区的多年冻土模型与制图研究的相关工作.

3 国内外高山冻土模型与制图的发展趋势

综上所述, 无论是经验统计模型, 还是过程模型, 都是基于对实地高山多年冻土分布状况的一种近似模拟, 因而, 或多或少地会存在一定的误差, 模型的好坏在于所绘制的高山多年冻土图与冻土实际分布状况的吻合程度. 从各种高山冻土模型与制图的发展过程来看, 高山多年冻土模型与制图的未来研究呈现出多元化研究和细化研究的趋势.

(1) 影响因素多元化. 经验统计模型从过去的考虑单一因素和建立二元回归模型, 逐渐演变成为考虑多个影响因素的多因素和多元回归模型, 如从单一的 BTS 经验模型和地形经验模型发展到以 BTS 和地温为代理值, 建立起各影响因素与 BTS 和地温之间的经验统计模型; 从以往只注重气候 (气温) 和地形因素 (高程) 的影响发展为考虑气候-地形 (气温、高程、坡度、坡向、太阳辐射)、植被、积雪、地表水分等各种因素的影响.

(2) 研究方法多元化. 从经验统计模型的建立方法来看, 以往的研究多是采用一元或多元统计回归和相关分析的方法建立起影响因素与指示变量之间的函数关系. 逻辑斯蒂回归是近年来引入到高山冻土模型与制图领域的模型方法, 并取得了较好的结果^[20, 22, 67]. 随着高山多年冻土模型与分布研究的进一步深化, 更多的研究方法将会被引入.

(3) 冻土指数多元化. 随着研究方法的多元

化,在 BTS、年均地温、石冰川等代理值(指标)研究的基础上,描述高山冻土存在与影响因素之间关系的指数呈现多元化趋势。Lewkowicz 等^[20]根据逻辑斯蒂回归模型,引入 p (probability) 指数,分别建立单一影响因素的 p 值和多影响因素作用下的综合 p 值,据此进行多年冻土存在的判断和分布的划分; Etzelm Üler 等^[67]基于地形参数和地表覆被信息,建立起高山冻土存在与影响因素之间的 f (favourability) 指数模型,充分运用 GIS 技术中以“层”的形式管理和分析数据,每一层代表一个影响因素、赋予不同的权重,最后各个影响因素加权叠加得到不同地点的 f 值,据此判断冻土存在状况并绘制区域冻土图。这些指数的建立,扩大了高山冻土模型与分布制图领域的研究思路,摒弃了以往那种必须寻找代理值、建立代理值与影响因素间的统计关系的研究模式。

(4) 经验统计模型与过程模型的综合。由于经验统计模型和能量平衡模型各自存在的缺陷和具有的优势,二者的结合成为未来高山冻土模型与分布研究的趋势,过程模型的研究结果可以借助于经验统计模型在较大的区域范围内进行应用和推广。此外,各种经验统计模型在建立的时候各有侧重,在未来的发展过程中,各种经验统计模型互通有无、互相借鉴也必然成为发展趋势。

(5) 冻土制图方面,野外调查方法与模型相结合、GIS 技术的应用。在未来的冻土制图研究领域,随着冻土野外勘察技术的提高,实测资料的不断补充和完善,野外调查方法与模型相结合将极大地改善冻土制图的精度。与此同时,凭借强大的数据存储、处理和分析能力,以及优越的制图能力,GIS 技术在高山冻土模型和制图领域的应用已经成为高山多年冻土制图领域的主流。

参考文献(References):

- [1] Cheng Guodong, Dramis F. Distribution of mountain permafrost and climate [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1992, **3**(2): 83 - 91.
- [2] Haeberli W. Special aspects of high mountain permafrost methodology and zonation in the Alps [C]// Third International Conference on Permafrost. Ottawa: National Research Council, 1978, **1**: 379 - 384.
- [3] Harris S A. Permafrost distribution, zonation and stability along the eastern ranges of the cordillera of North America [J]. *Arctic*, 1986, **39**(1): 29 - 38.
- [4] King L. Zonation and ecology of high mountain permafrost in Scandinavia [J]. *Geografiska Annaler*, 1986, **68**(3): 131 - 139.
- [5] Nelson F E. Permafrost zonation in Eastern Canada: a review of published maps [J]. *Physical Geography*, 1989, **10**: 233 - 248.
- [6] Wang Jiacheng. General aspect of alpine permafrost research abroad [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, **4**(4): 75 - 81. [王家澄. 国外高山多年冻土研究概况[J]. 冰川冻土, 1982, **4**(4): 75 - 81.]
- [7] Cheng Guodong, Wang Shaoling. On the zonation of high-altitude permafrost in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, **4**(2): 1 - 16. [程国栋, 王绍令. 试论中国高海拔多年冻土带的划分[J]. 冰川冻土, 1982, **4**(2): 1 - 16.]
- [8] Cheng Guodong. Problems on zonation of high-altitude permafrost [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1984, **39**(2): 185 - 193. [程国栋. 我国高海拔多年冻土地带性规律之探讨[J]. 地理学报, 1984, **39**(2): 185 - 193.]
- [9] Hoelzle M, Mittaz C, Etzelm Üler B, et al. Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European mountain areas: an overview of current developments [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, **12**(1): 53 - 68.
- [10] Etzelm Üler B, Hoelzle M, Heggem E S F, et al. Mapping and modelling the occurrence and distribution of mountain permafrost [J]. *Norwegian Journal of Geography*, 2001, **55**: 186 - 194.
- [11] Hoelzle M, Wegmann M, Krummenacher B. Miniature temperature dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas: first experience from the Swiss Alps [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1999, **10**(2): 113 - 124.
- [12] Harris C, Haeberli W, Vonder M D, et al. Permafrost monitoring in the high mountains of Europe: the PACE Project in its global context [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, **12**(1): 3 - 11.
- [13] Vonder M D, Stucki T, Haeberli W. Borehole temperatures in Alpine permafrost: A ten year series [C]// Seventh International Conference on Permafrost (Yellowknife, Canada). Collection Nordicana, 1998, **57**: 1089 - 1095.
- [14] Isaksen K, Holmlund P, Sollid J L. Three deep alpine permafrost boreholes in Svalbard and Scandinavia [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, **12**(1): 13 - 26.
- [15] Hoelzle M, Haeberli W, Keller F. Application of BTS measurements for modelling mountain permafrost distribution [C]// Sixth International Conference on Permafrost (Beijing, China). Guangzhou: University of Technology Press, 1993: 272 - 277.
- [16] Hoelzle M. Permafrost occurrence from BTS measurements and climatic parameters in the Eastern Swiss Alps [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1992, **3**(2): 143 - 147.
- [17] Imhof M. Modelling and verification of the permafrost distribution in the Bernese Alps (Western Switzerland) [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1996, **7**(3): 267 - 280.
- [18] Ødegård R S, Hoelzle M, Johansen K V, et al. Permafrost mapping and prospecting in southern Norway [J]. *Norwegian Journal of Geography*, 1996, **50**: 41 - 54.
- [19] Isaksen K, Hauck C, Gudevang E, et al. Mountain permafrost distribution in Dovrefjell and Jotunheimen, southern Norway, based on BTS measurements and 2D tomography data [J]. *Norwegian Journal of Geography*, 2002, **56**(2): 122 - 136.
- [20] Antoni GL, Mark E. Probability mapping of mountain permafrost

- frost using the BTS method, Wolf Creek, Yukon Territory, Canada [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2004, **15** (1): 67 - 80.
- [21] Ishikawa M, Hirakawa K. Mountain permafrost distribution based on BTS measurements and DC resistivity soundings in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, Japan [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, **11**(2): 109 - 123.
- [22] Asunci6n J, Javier C. Permafrost distribution from BTS Measurements (Sierra de Telera, Central Pyrenees, Spain): Assessing the importance of solar radiation in a mid - elevation shaded mountainous area [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2007, **18**(2): 137 - 149.
- [23] Moscicki J W, Ke6dzia S. Investigation of mountain permafrost in the Kozia Dolinka valley, Mountains, Poland [J]. *Norwegian Journal of Geography*, 2001, **55**(4): 235 - 240.
- [24] Cheng Guodong, Zhou Youwu. State of the art and prospect of geocryology in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, **10**(3): 221 - 227. [程国栋, 周幼吾. 中国冻土学的现状和展望[J]. *冰川冻土*, 1988, **10**(3): 221 - 227.]
- [25] Østrem G. Ice-cored moraines in Scandinavia [J]. *Geografiska Annaler*, 1964, **46**(3): 282 - 337.
- [26] Fisch W S, Fisch W J, Haeblerli W. Electrical DC resistivity - soundings with long profiles on rock glaciers and moraines in the Alps of Switzerland [J]. *Zeitschrift f6r Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 1977, **13**: 239 - 260.
- [27] Vonder M D, Klinge E. Gravimetric investigation of ice-rich permafrost within the rock glacier Murt 6 Corvatsch [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1994, **5**(1): 13 - 24.
- [28] Lehmann F, Green A G. Topographic migration of Georadar data: implications for acquisition and processing [J]. *Geophysics*, 2000, **65**: 836 - 848.
- [29] Vonder M D, Hauck C, Gubler H, *et al.* New geophysical methods of investigating the nature and distribution of mountain permafrost with special reference to radiometry techniques [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, **12**(1): 27 - 38.
- [30] Christian H, Vonder M D. Detecting alpine permafrost using electro-magnetic methods [J]. *Advances in Cold-Region Thermal Engineering and Sciences, Lecture Notes in Physics*, 1999, **533**: 475 - 482.
- [31] Vonder M D, Hauck C, Lehmann F. Verification of geophysical models in Alpine permafrost using borehole information [J]. *Annals of Glaciology*, 2000, **31**: 300 - 306.
- [32] Hauck C, Vonder M D. Inversion and interpretation of two-dimensional geoelectrical measurements for detecting permafrost in mountainous regions [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, **14**(4): 305 - 318.
- [33] Hauck C. Frozen ground monitoring using DC resistivity tomography [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**: 2016.
- [34] Huang Yizhi, Gu Zongwei, Zeng Zhonggong, *et al.* Geophysical method used for permafrost survey in China [C]// *Proceedings of Second National Conference on Permafrost*. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1983: 170 - 180. [黄以职, 顾钟伟, 曾仲巩, 等. 我国多年冻土调查中的物探方法[C]// *第二届全国冻土学术会议论文集*. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 170 - 180.]
- [35] Yu Qihao, Cheng Guodong. Application of geophysical methods to permafrost in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, **24**(1): 102 - 108. [俞祁浩, 程国栋. 物探技术在我国多年冻土勘测中的应用[J]. *冰川冻土*, 2002, **24**(1): 102 - 108.]
- [36] Wang Wenlong, Wang Hai. Geophysical methods in the exploration of permafrost along the Qinghai-Tibet Railway: selection and application [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(Suppl. 1): 29 - 34. [王文龙, 王海. 青藏铁路多年冻土勘察的物探方法选择及其应用效果[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(增刊 1): 29 - 34.]
- [37] Kneisel C. New Insights into mountain permafrost occurrence and characteristics in Glacier Forefields at high altitude through the application of 2D resistivity imaging [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2004, **15**(3): 221 - 227.
- [38] Hauck C, Vonder M D. Evaluation of geophysical techniques for application in mountain permafrost studies [J]. *Zeitschrift f6r Geomorphologie*, 2003, **132**(Supplement): 161 - 190.
- [39] Etzelm6ller B, Rune S, Berthling T, *et al.* Terrain parameters and remote sensing data in the analysis of permafrost distribution and periglacial processes: principles and examples from Southern Norway [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2001, **12**(1): 79 - 92.
- [40] Liang Fengxian, Luo Xiangrui. The identification labels of periglacial geomorphology on aerial photos [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, **3**(4): 72 - 78. [梁凤仙, 罗祥瑞. 冰缘地貌现象在航片上的识别标志[J]. *冰川冻土*, 1981, **3**(4): 72 - 78.]
- [41] Cao Meisheng, Li Xin, Chen Xianzhang, *et al.* *Remote Sensing of Cryosphere* [M]. Beijing: Science Press, 2006: 249 - 252. [曹梅盛, 李新, 陈贤章, 等. *冰冻圈遥感*[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 249 - 252.]
- [42] Hauck C, Isaksen K, Vonder M D, *et al.* Geophysical surveys designed to delineate the altitudinal limit of mountain permafrost: an example from Jotunheimen, Norway [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2004, **15**(3): 191 - 205.
- [43] Ikeda A. Combination of conventional geophysical methods for sounding the composition of rock glaciers in the Swiss Alps [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2006, **17**: 35 - 48.
- [44] Hauck C, Vonder M D, Russill N, *et al.* An integrated geophysical study to map mountain permafrost: A case study from Norway [C]. 6th EEGS Meeting (Bochum, Germany), 2000: 1 - 4.
- [45] Li Xin. *The Cryospheric Information System and Its Applications* [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Academy Sinica, 1998: 1 - 98. [李新. *冰冻圈信息系统及其应用*[D]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1998: 1 - 98.]
- [46] Nan Zhuotong. Study on Characteristics of Permafrost Distribution on the Qinghai-Tibet Plateau and Construction of Digital Roadbed of the Qinghai-Tibet Railway [D]. Lanzhou: Cold and Arid Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2003: 1 - 119. [南卓铜. *青藏高原冻土分布研究及青藏铁路数字路基建设*[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2003: 1 - 119.]
- [47] Kneisel C, Hauck C, Vonder M D. Permafrost below the timberline confirmed and characterized by geoelectric resistivity measurements, Bever Valley, Eastern Swiss Alps [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, **11**(4): 295 - 304.
- [48] Gude M, Dietrich S, M6usbacher R, *et al.* Probable occur-

- rence of sporadic permafrost in non-alpine scree slopes in central Europe [C]// Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost. Zurich, 2003: 331 - 336.
- [49] Wang Shaoling, Ding Yongjian, Zhao Lin, *et al.* The influence of local factor on surface layer ground temperature in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2002, **21**(1): 85 - 89. [王绍令, 丁永建, 赵林, 等. 青藏高原局地因素对近地表层地温的影响[J]. 高原气象, 2002, **21**(1): 85 - 89.]
- [50] Cheng Guodong. Effects of local factors on the distribution of permafrost and revelation to the design of Qinghai - Tibet railway [J]. Science in China (Series D), 2003, **33**(6): 602 - 607. [程国栋. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示[J]. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(6): 602 - 607.]
- [51] Catherine S M, Hoelzle M, Haeberli W. Modelling alpine permafrost distribution based on energy-balance data: a first step [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2002, **13**(4): 271 - 282.
- [52] Li Xin, Cheng Guodong. Review on the interaction models between climatic system and frozen soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(3): 315 - 321. [李新, 程国栋. 冻土-气候关系评述[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(3): 315 - 321.]
- [53] Keller F, Frauenfelder R, Gardaz J M, *et al.* Permafrost map of Switzerland [C]// Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost. Yellowknife: Collection Nordicana, 1998: 557 - 562.
- [54] Gruber S, Hoelzle M. Statistical modelling of mountain permafrost distribution-local calibration and incorporation of remotely sensed data [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2001, **12**(1): 69 - 77.
- [55] Wu Qingbai, Li Xin, Li Wenjun. Computer simulation and mapping of the regional distribution of permafrost along the Qinghai-Xizang Highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22**(4): 323 - 326. [吴青柏, 李新, 李文君. 青藏公路沿线冻土区域分布计算机模拟与制图[J]. 冰川冻土, 2000, **22**(4): 323 - 326.]
- [56] Henry K, Smith M. A model-based map of ground temperatures for the permafrost regions of Canada [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2001, **12**(4): 389 - 398.
- [57] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Liu Yongzhi. Mean annual ground temperature distribution on the Tibetan Plateau Permafrost distribution mapping and further application [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(2): 142 - 148. [南卓铜, 李述训, 刘永智. 基于年平均地温的青藏高原冻土分布制图及应用[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(2): 142 - 148.]
- [58] Li Shuxun, Wu Tonghua. The relationship between air temperature and ground temperature in the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(5): 627 - 632. [李述训, 吴通华. 青藏高原地气温度的关系[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(5): 627 - 632.]
- [59] Barsch D, Fierz H, Haeberli W. Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps [C]// Third International Conference on Permafrost. Ottawa, National Research Council, 1979: 349 - 353.
- [60] Cui Zhijiu, Zhu Cheng. Commentaries and prospects of the study on periglacial geomorphology [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, **10**(3): 304 - 311. [崔之久, 朱诚. 我国冰缘地貌研究述评与展望[J]. 冰川冻土, 1988, **10**(3): 304 - 311.]
- [61] Barsch D. Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geocology in High Mountain Environments [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996:331.
- [62] Frauenfelder R, Allgower B, Haeberli W, *et al.* Permafrost investigations with GIS - a case study in the Fletschhorn area, Wallis, Swiss Alps [C]// Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost. Yellowknife, Collection Nordicana, 1998: 551 - 556.
- [63] Lambiel C, Reynard E. Regional modelling of present, past and future potential distribution of discontinuous permafrost based on a rock glacier inventory in the Bagnes - Héron area (Western Swiss Alps) [J]. Norwegian Journal of Geography, 2001, **55**, 219 - 223.
- [64] Jason R J. The occurrence of alpine permafrost in the Front Range of Colorado [J]. Geomorphology, 2005, **67**(3): 375 - 389.
- [65] Yoshikawa K, Larry D H, Gogineni P. Ground temperature and permafrost mapping using an equivalent latitude/elevation model [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(5): 526 - 531.
- [66] Guglielmina M, Aldighierib B, Testab B. PERMACLIM: a model for the distribution of mountain permafrost, based on climatic observations [J]. Geomorphology, 2003, **51**(4): 245 - 257.
- [67] Eitzelm üler B, Heggem E S F, Sharkhuu N, *et al.* Mountain permafrost distribution modelling using a multi-criteria approach in the Hövsgöl Area, Northern Mongolia [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, **17**(2): 91 - 104.

Progress in Mapping and Modeling the Distribution of Alpine Permafrost in China and Abroad

LI Jing^{1,2}, SHENG Yu¹, JIAO Shi-xing^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. Department of Resource & Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang Anhui 455002, China; 3. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing Jiangsu 210093, China)

Abstract: Alpine permafrost refers to the permafrost existing at high altitude in the middle and low latitudes, which involve so-called high-altitude and high mountain permafrost. In the recent years, various kinds of human and engineering activities implemented in mountain areas accelerate the development in the field of mapping and modeling the distribution pattern of alpine permafrost. The subjects about the distribution of alpine permafrost, the regional permafrost modeling and mapping etc.

are all paid a large amount of attentions by experts in the world in the past decades. In this paper, the past and present development in the field about measuring methods in the field, permafrost survey and zonation, mapping and modeling in China and abroad is reviewed, and their virtues and shortcomings are also summarized. Finally, it is pointed out that the development tendency in the field of modeling and mapping of alpine permafrost in China and abroad.

Key words: alpine permafrost; distribution model; permafrost mapping; research progress