

主编 马巍
副主编 牛富俊

寒旱区工程与 环境研究

——程国栋院士七十华诞学术研讨会文集
Research Monograph of Cold and Arid
Regions Engineering and Environment
—A Collection of the Papers Dedicated to
The 70th Birthday of Academician
CHENG Guodong



兰州大学出版社

寒旱区工程与环境研究

——程国栋院士七十华诞学术研讨会文集

Research Monograph of Cold and Arid
Regions Engineering and Environment
—A Collection of the Papers Dedicated to
The 70th Birthday of Academician
CHENG Guodong

主 编	马 巍
副主编	牛富俊
编 委	赖远明 吴青柏 刘光琇
	李 新 冯 起 徐中民
	赵文智 曲建军 张耀南
	王贵荣 王 建 冯虎元



兰州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

寒旱区工程与环境研究:程国栋院士七十华诞学术研讨会文集/马巍主编. —兰州:兰州大学出版社,
2012.5

ISBN 978-7-311-03917-2

I. ①寒… II. ①马… III. ①寒带—干旱区—环境工程—文集 IV. ①X321-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 108214 号

责任编辑 魏春玲 张萍

封面设计 张友乾

书名 寒旱区工程与环境研究
——程国栋院士七十华诞学术研讨会文集
主编 马巍
副主编 牛富俊
出版发行 兰州大学出版社 (地址:兰州市天水南路 222 号 730000)
电话 0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心)
0931-8914298(读者服务部)
网址 <http://www.onbook.com.cn>
电子信箱 press@lzu.edu.cn
印刷 兰州人民印刷厂
开本 787 mm×1092 mm 1/16
印张 41.5 (插页 4)
字数 865 千
版次 2012 年 6 月第 1 版
印次 2012 年 6 月第 1 次印刷
书号 ISBN 978-7-311-03917-2
定价 165.00 元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)



程国栋院士

程国栋院士简历

程国栋，1943年7月生，上海人，1965年毕业于北京地质学院（现中国地质大学）水文地质与工程地质专业，现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所研究员，博士生导师，中国科学院院士，俄罗斯工程科学院院士。研究方向：冻土学、水文水资源。

工作简历

1965—1978年	中科院冰川冻土沙漠所	研究实习员
1978—1983年	中科院兰州冰川冻土所	副主任 助理研究员
1983—1986年	中科院兰州冰川冻土所	主任 副研究员
1984—1986年	美国陆军寒区研究和工程实验室	进修 名誉研究员
1986—1990年	中科院兰州冰川冻土所	主任 研究员
1990—1991年	中科院兰州冰川冻土所	副所长 研究员
1991—1999年	中科院兰州冰川冻土所	所长 研究员
1996—2005年	冻土工程国家重点实验室	主任 研究员
1998—2012年	中科院兰州分院	院长
1999—2001年	中国科学院寒区旱区环境与工程研究所	所长

学术社会团体任职

1983—1988年	国际雪冰委员会地下冰分会	主席
1988—1993年	国际冻土协会	副主席
1993—1998年	国际冻土协会	主席
1993年11月	当选为中国科学院院士	
1993—2005年	世界数据中心 WDC-D 冰川冻土分中心	主任
1995—2004年	中国地理学会冰川冻土分会	主任
1995—2011年	中国地理学会	常务理事
1996—至今	西部资源环境科学研究中心	首席科学家
1983—2011年	《Cold Regions Science and Technology》(荷兰)	编辑委员会委员
1990—至今	《Permafrost and Periglacial Processes》(英国)	编辑委员会委员
2000—至今	《冰川冻土》	主编
2000—2008年	国家自然科学基金委第四届全委会	委员
2001—至今	甘肃省科技教育领导小组	成员
2001—至今	中国科学院第六届学位委员会	成员
2001—至今	甘肃省西部大开发领导小组	副组长
2001—至今	甘肃省科协	副主席
2008—至今	国家自然科学基金委地学部	主任
2009—至今	《Sciences in Cold and Arid Regions》(中国)	主编
2009年9月	当选俄罗斯工程科学院院士	

利用扩展的地面冻结数模型模拟青藏高原冻土分布

黄培培, 南卓铜*, 赵林

(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)

摘要:准确的青藏高原多年冻土分布信息是进行青藏高原重大工程建设规划、生态与环境影响评估与保护的重要基础资料。发展冻土分布模型是研究青藏高原多年冻土分布的主要手段。本文利用扩展的地面冻结数模型进行青藏高原多年冻土模拟,创新点在于利用实际调查的三个代表不同冻土类型的典型区进行模型的参数率定,然后根据典型区的地形气候特性将青藏高原划分为三个区,分别模拟从而完成整个高原的多年冻土分布制图。模拟结果与原地面冻结数模型和《中国冰川冻土沙漠图》青藏高原部分冻土分布进行了对比,表明本文建议的方法在东部复杂地形区和高原南部岛状冻土区较能体现优越性。模拟表明,青藏高原多年冻土 $94.79 \times 10^4 \text{ km}^2$,比《中国冰川冻土沙漠图》少约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$,差别主要在中南部岛状冻土分布区、高原边缘及东南部零星多年冻土分布区域。

关键词:地面冻结数模型; 多年冻土; 青藏高原; 空间分布

Permafrost distribution simulation over the Qinghai-Tibet plateau with the extended surface frost number model

HUANG Pei-pei, NAN Zhuo-tong, ZHAO Lin

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Accurate information of permafrost distribution over the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) is vital for construction planning and ecological assessment and protection in this area. Development of permafrost distribution models is one of key approaches to obtain

* 基金项目: 科技基础性工作专项(2008FY110200); 国家重点实验室开放基金(SKLFSE201009)

作者简介: 黄培培(1986-), 河南永城人, 在读硕士研究生, 2009 年毕业于河南大学获学士学位, 主要从事基于遥感的寒区冻土模拟研究。E-mail: huangyingbing@yeah.net

通讯作者: 南卓铜(1977-), 浙江乐清人, 研究员, 2003 年获中国科学院研究生院理学博士学位, 研究兴趣包括寒区水文建模、数据共享、决策支持系统。E-mail: nztong@lzb.ac.cn

accurate information of permafrost distribution over the extensive QTP. In this study, an extended surface frost number model (E-FROSTNUM) is applied to simulate the distribution of permafrost on QTP. The innovations lay in that it takes three typical investigated areas, representing distinct types of permafrost, to calibrate the parameter in the model that indicates the thermal heterogeneity of soil, and then models the whole plateau by aggregating all three partitions that are divided on basis of topographic and climatic characteristics, matching each typical investigation areas respectively. An comparison analysis of the simulated and the QTP part of “Map of Glacier, Permafrost and Desert in China” (1:4 million, 2005) reveals the proposed methodology of this paper is superior in the areas with complex topography such as the eastern and southern parts of QTP. The simulated permafrost area is 0.9479 million sq. km, 0.2 million sq. km less than that in the Map. The variations are mainly located in the island permafrost areas of the centered south, edge areas of QTP, and sporadic permafrost area of southeastern QTP.

Key Words: surface frost number; permafrost; the Qinghai-Tibet plateau (QTP); spatial distribution

1 引言

准确的青藏高原多年冻土分布信息是进行青藏高原重大工程建设规划、生态与环境影响评估与保护的重要基础资料^[1]。在冻土分布的研究中,传统的冻土调查手段便于在小范围内开展,但由于人力、经费及条件的限制,不可能在面积达 $267 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的青藏高原全面开展冻土调查,冻土分布模型的发展显得特别重要。目前,国内外已发展了许多冻土分布模型,大概可分为基于物理过程的模型和基于经验统计分析的模型两类^[2]。由于青藏高原数据条件的限制,不能满足基于物理过程模型的参数要求,因此,基于统计分析关系的经验模型在青藏高原上得到广泛的应用。其中,Nelson & Outcalt 提出的地面冻结数模型^[3],在高纬度冻土分布模拟中有较好的效果^[4,5],也被其他区域所广泛应用。李新^[6]、王之夏^[7]曾分别在青藏高原应用 Nelson 地面冻结数模型,但由于模型本身缺少对局地因素的考虑,模拟结果并不理想也缺少必要的验证。南卓铜等^[8]经过重新推导,在原地面冻结数公式基础上引入一个反映土壤冻融状态热性质差异的参数,原公式作为一个特例给出,指出考虑土壤性质的空间差异性会提高模拟精度。

科技基础性工作专项“青藏高原多年冻土本底调查”于 2009 年启动后,在青藏高原开展了若干个小范围的典型区的详细冻土调查^[9]。本文使用了其中三个有着详尽调查资料的典型区(温泉、改则和西昆仑)冻土调查图,分别代表青藏高原东部地形复杂及海拔相对较低的边缘区域、中南部岛状冻土区域和高原腹地多年冻土发育区域。结合遥感数据,本文率定了土壤热参数,应用扩展的地面冻结数模型^[8]得到青藏高原整体的冻土分布。

2 数据和方法

2.1 研究区

青藏高原面积约 267 万 km², 平均海拔为 4320 m, 是典型的高原气候, 整体降水量较少。青藏高原是亚洲许多大江大河的发源地。植被自东南向西北表现为森林—灌木—草甸—草原—荒漠。土壤类型以寒冻钙土、寒毡土、褐土、棕土为主。青藏高原也是多年冻土发育地带。

用于参数率定的三个典型区温泉、改则和西昆仑位置图如图 1 所示。温泉区面积 2584 km², 湖泊面积为 113 km², 海拔在 3430~5300 m, 地处青藏高原东部, 地形较为复杂植被多样, 属于高原温带。温泉区在都兰县和兴海县交汇处, 区内有苦海, 曲什安河和大河坝河流经于此。改则区位于南羌塘高湖盆区, 面积 41251 km², 湖泊面积为 200 km², 平均海拔为 4700 m, 较平缓, 是连续多年冻土向岛状多年冻土过渡区, 属于亚寒带。改则区位于改则县和尼玛县交界处, 区内及周围有零星湖泊分布, 但无水系和冰川发育。西昆仑区处于大片连续多年冻土西缘, 面积约 43593 km², 冰川湖泊面积 6252 km², 海拔 4400~5600 m。此地区多为稳定的多年冻土分布。西昆仑区位于和田县、日土县和策勒县的交接处, 区内及周围多河流发育, 中部及东南部有湖泊分布。

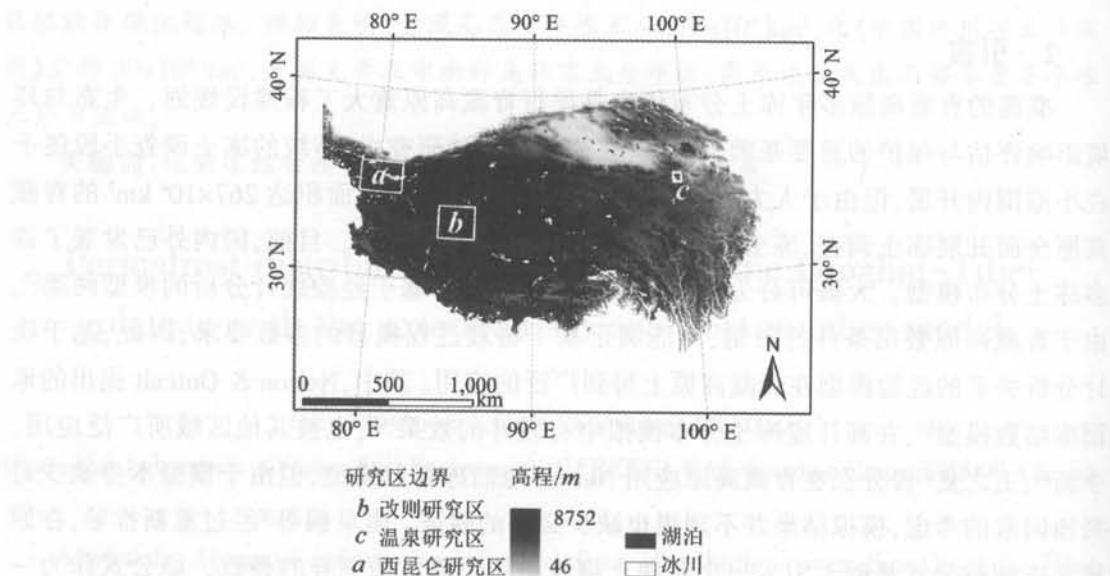


图 1 典型区(温泉、改则和西昆仑)在青藏高原的空间分布

2.2 扩展的冻结数模型

地面冻结数模型(FROSTNUM)^[3]一般被归为经验统计模型, 利用地面冻结与融化指数, 计算表示冻融指数关系的地面冻结数 F , 并据此来划分冻土类型。扩展的地面冻结数模型(E-FROSTNUM)^[8]在 FROSTNUM 模型基础上增加了指示土壤热性质的参数 E :

$$F = \frac{\sqrt{|DDF|}}{\sqrt{|DDF|} + E\sqrt{|DDT|}} \quad (1)$$

其中,DDF、DDT 分别是地面冻结指数、融化指数($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$); E 是无量纲参数, 表征影响冻土形成、发展和变化过程并取决于岩土冻融性质的因子。当 $E=1$, 式(1)即为原冻结数模型。根据 Nelson & Outcalt 的建议, 取 $F=0.5$ 作为划分季节冻土与多年冻土的界限^[3]。

2.3 数据

E-FROSTNUM 模型需要冻结、冻融指数的输入。由于青藏高原观测站点有限且分布不均, 王之夏等比较了遥感 MODIS 地面温度(LST)数据和内插观测站点 0 cm 数据两个数据源进入 FROSTNUM 模型的情况, 发现基于 MODIS LST 的 FROSTNUM 模型有不错的模拟结果^[10]。因此, 本文也利用了 1 km 空间分辨率、1 d 时间分辨率的 2003—2008 年 MODIS 地表温度产品(LST)计算地面冻结和融化指数。高程数据是重采样为 1 km 分辨率的 SRTM-DEM 数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/>)。

温泉、改则和西昆仑三个典型区的冻土调查图则用来作为热物理参数 E 的率定。典型区冻土区分布图是基于丰富的野外实地调查(包括钻、坑探、电磁法、探地雷达等手段)结果, 结合高程模型拓展到区域, 并结合植被、道路、河流、湖泊、湿地等分布以及冰缘地貌进行细致的纠正。在本研究中, 我们认为典型区多年冻土分布调查的结果是比较可靠的。原调查图空间分辨率 250 m。为了与整个青藏高原制图分辨率一致, 重采样为 1 km。

用于验证的 1:400 万《中国冰川冻土沙漠图》^[11]成图于 2005 年, 青藏高原部分是基于年平均地温模型模拟结果, 由于此模型是在当时可获取的 76 个实际观测年平均地温数据的基础上回归得到^[12], 较好体现了青藏高原多年冻土分布的主要空间特性。

2.4 方法

图 2 给出了方法的流程图。第一步, 对三个典型区分别进行 E 参数率定, 以相关系数、总体精度和 Kappa 系数^[13]为目标函数。根据南卓铜等^[8]表明 E 越小多年冻土面积越大, 模拟 E 从 0.5 到 1.5 足够大的范围, 取步长为 0.1, 取目标函数最大, 然后在最优的 E 值基础上, 以 0.01 为步长, 再次进行率定, 得到精确到百分位的最优 E 值。

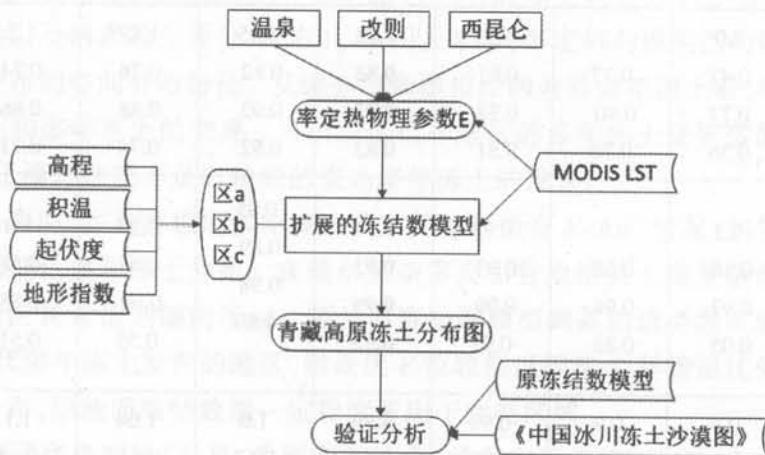


图 2 方法流程图

第二步, 根据典型区的气候和地形特征(表示为积温、高程、地形起伏度、地形指数

四个指标)把青藏高原分为三个区域,与3个典型区对应。取典型区率定好的 E 值,应用E-FROSTNUM模型分区模拟。

第三步,合并三个区的模拟结果,形成青藏高原多年冻土分布图。

第四步,模拟结果与FROSTNUM模型模拟结果及《中国冰川冻土沙漠图》青藏高原部分进行比较分析。通过典型区和青藏高原整体分别进行验证,比较冻土类型的面积大小、空间分布和差异区域。

3 结果与讨论

3.1 典型区参数率定

表1给出了两次率定结果的相关系数、总体精度和Kappa系数。结果显示,温泉、西昆仑和改则三个典型区的最优参数为1.14、0.94和0.99。最优化下相关系数、精度和Kappa系数最高。3个典型区的率定结果也证实了有必要对青藏高原进行分区,应用不同的参数 E 进行分区模拟。与原地面冻结数模型(即 $E=1$,表1中下划线数据)相比,经优化后的模拟结果有不同程度的提升,其中在温泉区和西昆仑区有较明显的提升,Kappa系数分别从0.36、0.51提升到0.83、0.93,但在改则区基本无提升。这说明在青藏高原与温泉区、西昆仑区类似的区域进行冻土分布模拟应当调整土壤热参数。

同时,表1也揭示了不同区域最优 E 值下的相关系数、精度和Kappa系数有明显差异,其中西昆仑区的三个指标均最高,温泉次之,改则最差。西昆仑区有稳定的多年冻土分布,多数多年冻土分布模型都有不错的模拟表现^[14]。改则区处在高原中南部,分布着岛状多年冻土,复杂的地形及水热条件使得冻土的发育有更多的制约因素^[15],导致无论是否经参数率定模拟结果均不佳。E-FROSTNUM模型在温泉区经过参数率定后,则可以得到较理想的模拟结果。

表1 两次率定综合简表

(粗体数据是最优 E 值下的E-FROSTNUM模拟,下划线数据是原地面冻结数模型结果)

	E	1.0	1.1	1.13	1.14	1.15	1.19	1.2	1.5
温 泉	相关系数	<u>0.47</u>	0.77	0.81	0.83	0.82	0.76	0.74	0.14
	总体精度	<u>0.77</u>	0.90	0.92	0.92	0.92	0.88	0.86	0.36
	Kappa	<u>0.36</u>	0.76	0.81	0.83	0.82	0.74	0.71	0.04
西 昆 仑	E	0.5	0.9	0.93	0.94	0.95	0.99	1.0	1.5
	相关系数	0.16	0.88	0.93	0.93	0.89	0.61	<u>0.58</u>	0.07
	精度	0.93	0.98	0.99	0.99	0.98	0.90	<u>0.88</u>	0.14
	Kappa	0.05	0.88	0.93	0.93	0.89	0.55	<u>0.51</u>	0.01
改 则	E	0.5	0.9	0.98	0.99	1.0	1.04	1.1	1.5
	相关系数	-	0.56	0.66	0.67	<u>0.67</u>	0.61	0.45	0.06
	总体精度	0.48	0.74	0.83	0.83	<u>0.83</u>	0.78	0.68	0.52
	Kappa	0.00	0.48	0.66	0.66	<u>0.66</u>	0.55	0.33	0.01

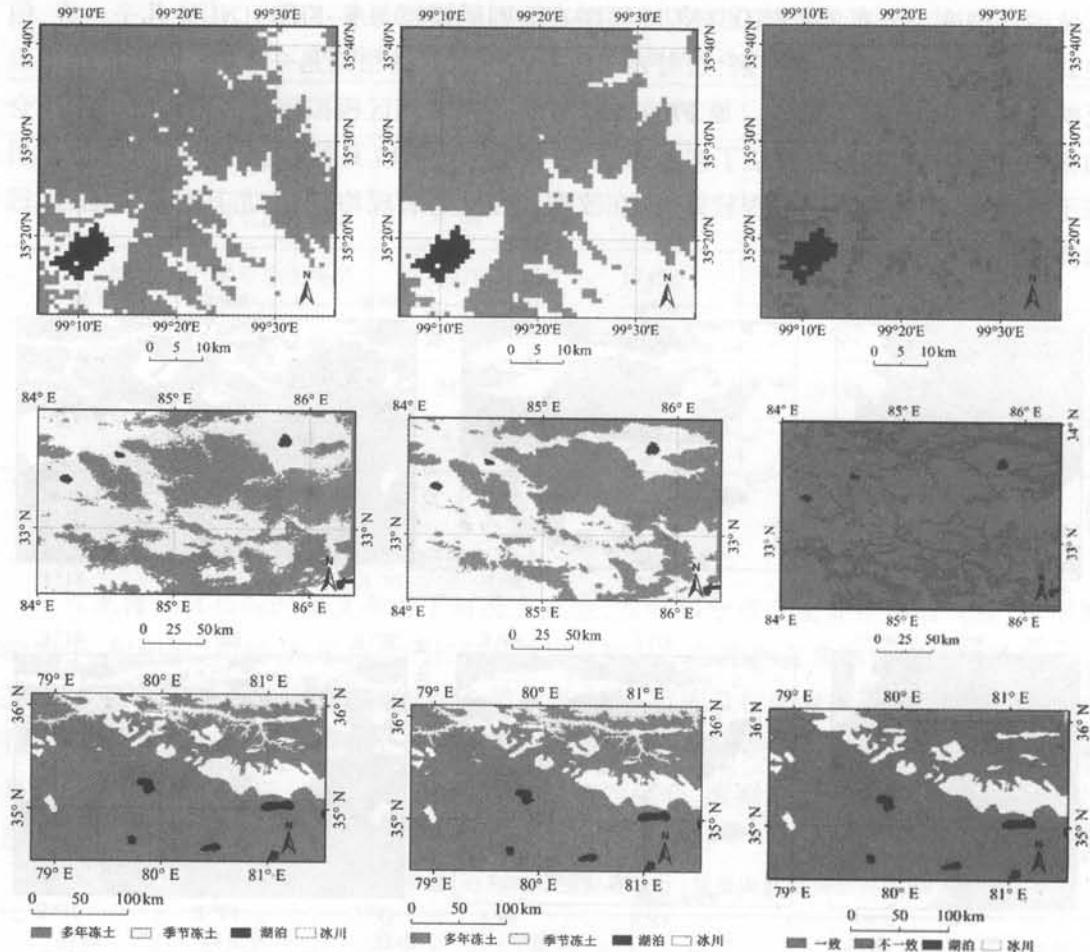


图 3 温泉(上)、改则(中)和西昆仑(下)的冻土调查图(左)、E-FROSTNUM 模拟图(中)及两者差异图(右)

图 3 给出了温泉(中)、改则(中)和西昆仑(下)的冻土调查图(左)、E-FROSTNUM 模型结果(中)以及两者的差异分布(右)。从图上来看,率定后的模拟图均能较为准确地模拟出冻土分布的空间分布特征。从调查图和模拟图的差异分布图上看,模拟误差多出现在季节冻土和多年冻土的交界,可能由于这些地区的多年冻土受更多的局域因素的影响,单纯的土壤热性质不足以精细的表达多年冻土的发育。

率定结果表明,在高寒稳定多年冻土分布的地区适合 $E < 1$ 的情况,如果应用原地面冻结数模型则低估多年冻土分布。在地形复杂多高山谷地植被土壤复杂而又靠近水热条件较好的地区其 E 值则倾向于 > 1 , 原地面冻结数模型则高估该类型区域的多年冻土分布。而在岛状多年冻土发育的地区,则最优 E 值较接近等于 1, 尽管最优值也不足以真实表达冻土分布,原地面冻结数能一定程度适用于此类区域。

图 4 给出了在典型区(温泉、改则和西昆仑)的率定后 E-FROSTNUM 模拟图(上)、原 FROSTNUM 模拟图(中)和《中国冰川冻土沙漠图》对应区域(下)。其中《中国冰川冻土沙漠图》与调查图有较大差异,说明基于年平均地温回归的模拟结果不能精确反映小

区域的详细冻土分布。原 FROSTNUM 模型在改则的模拟与 E-FROSTNUM 几乎一样,但在其余两个典型区有显著差别,这与表 1 统计指标揭示的结论是一致的。同样的结论也反映在面积的统计上(表 2)。原 FROSTNUM 模型对改则区模拟较好而对温泉和西昆仑的模拟结果较差,在温泉高估了多年冻土,在西昆仑则低估了多年冻土分布。《中国冰川冻土沙漠图》除在温泉的表现较好外,在改则和西昆仑表现均较差,尤其在改则地区,远高估了多年冻土分布。

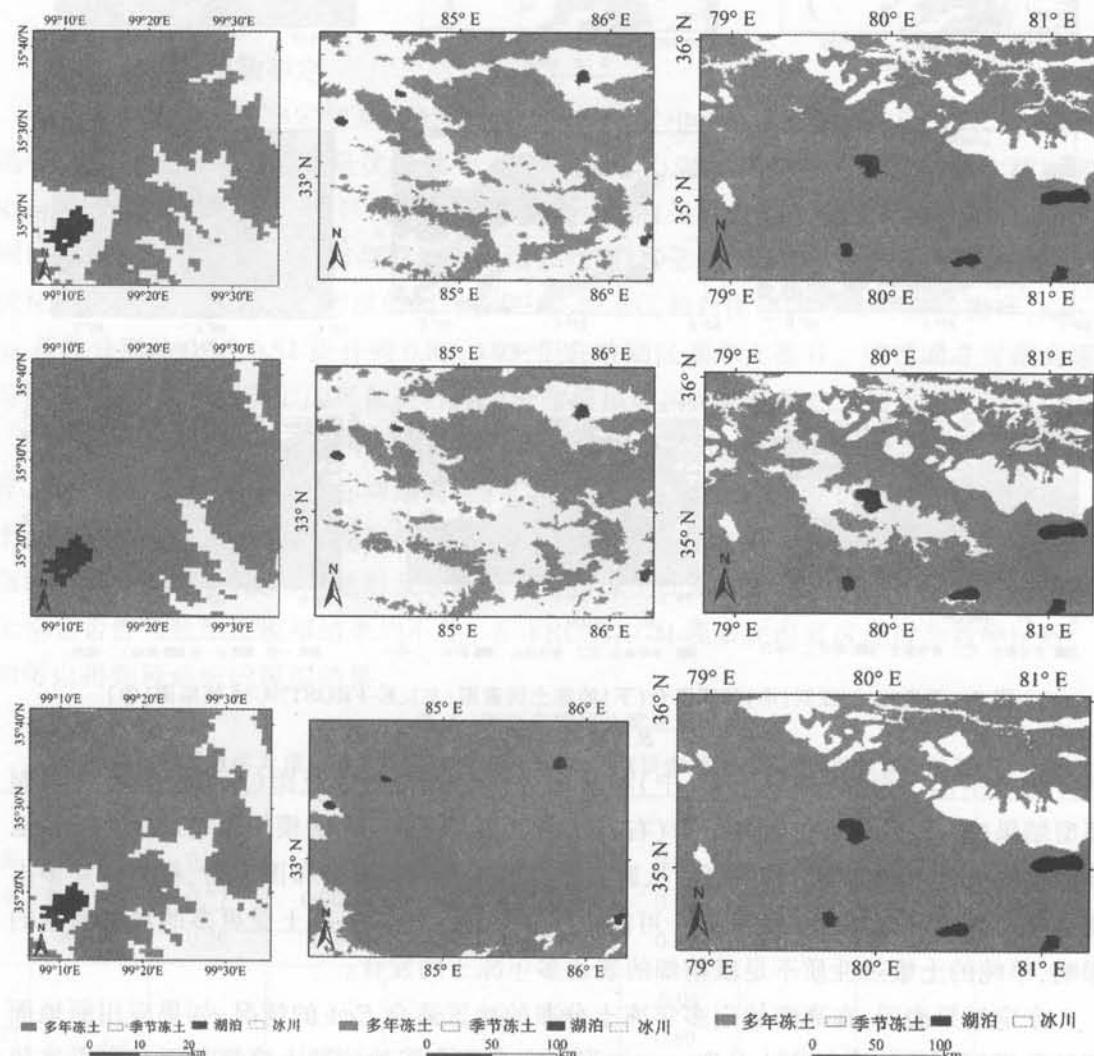


图 4 温泉(左)、改则(中)、西昆仑(右)率定后的 E-FROSTNUM 模拟(上)、
FROSTNUM 模拟(中)及《中国冰川冻土沙漠图》对应区域(下)

表 2 典型区调查图、E-FROSTNUM、FROSTNUM 和
《中国冰川冻土沙漠图》在 3 个典型区的冻土面积

		调查图	E-FROSTNUM	FROSTNUM	冻土图
温泉	多年冻土/km ²	1678	1666	2184	1693
	季节冻土/km ²	793	801	268	754
改则	多年冻土/km ²	19785	17453	16334	38373
	季节冻土/km ²	21266	23595	24652	2611
西昆仑	多年冻土/km ²	34762	34686	29332	35157
	季节冻土/km ²	2579	2677	7148	1195

3.2 青藏高原多年冻土分布

3.2.1 结合气候、地形特征的分区

在选择分区指标时本文考虑了对冻土发生、发展和分布有重要作用的气候、地形影响因子,如积温、高程、地形指数^[16]和起伏度^[17]等信息。各指标在典型区表现的统计如表 3。以各典型区指标平均值为基准结合最大最小值、范围及标准差做适当缓冲,确定每个指标下的分区,再根据各指标分区间的关系,统计得出决策树流程图(图 5),将青藏高原分为 3 个区域,即 a 区、b 区和 c 区,分别与西昆仑、改则和温泉的整体特征相匹配。图 6 是最后的分区结果图。

表 3 三个典型区的积温、地形特征指标的统计(括号内数据表示负值)

指标	典型区	最小	最大	范围	均值	标准方差
积温/℃	温泉	(2585.26)	416.76	3002.02	(1341.20)	540.15
	改则	(3869.58)	1559.67	5429.25	(1069.99)	576.66
	西昆仑	(5403.39)	1273.70	6677.09	(2182.60)	934.33
高程/m	温泉	3505.00	5153.00	1648.00	4352.57	234.90
	改则	4401.00	6140.00	1739.00	4992.14	234.23
	西昆仑	2722.00	6597.00	3875.00	5196.98	448.13
地形指数	温泉	(3.84)	8.33	12.17	(0.22)	2.32
	改则	(3.76)	12.14	15.89	0.96	2.58
	西昆仑	(4.57)	12.48	17.05	0.48	2.98
起伏度	温泉	115.00	1181.00	1066.00	611.50	221.16
	改则	16.00	1343.00	1327.00	439.44	208.02
	西昆仑	11.00	3263.00	3252.00	847.18	565.58

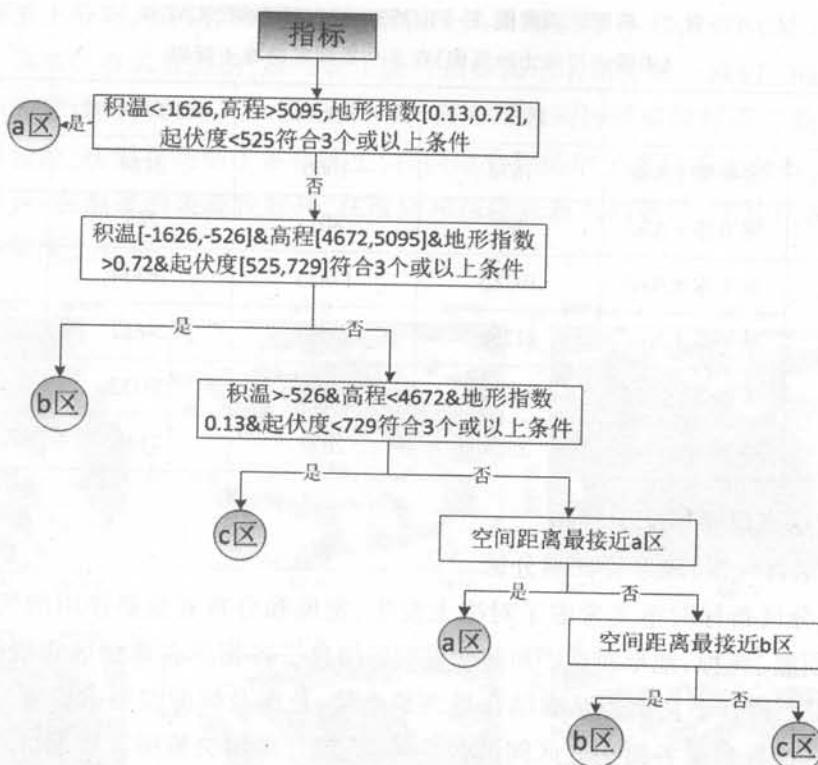


图 5 确定分区流程图

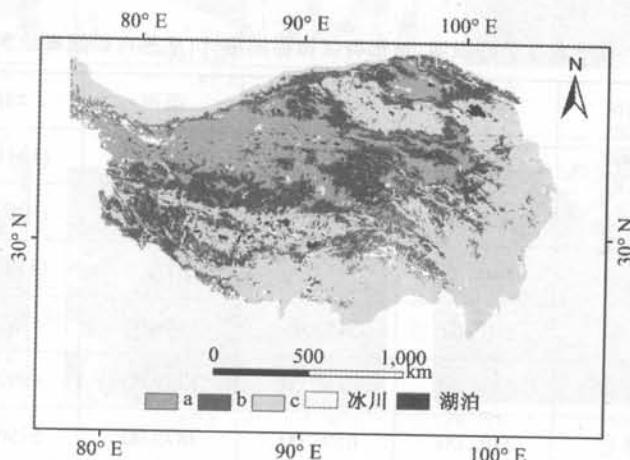


图 6 分区结果图(a 区 E 取值 0.94,b 区 E 取值 0.99,c 区 E 取值 1.14)

3.2.2 模拟结果

图 7a 是应用 E-FROSTNUM 分区模拟后形成的整体青藏高原冻土分布图。作为对照分析,图 7b 是《中国冰川冻土沙漠图》青藏高原部分的冻土分布。表 4 给出两者的面积情况,《中国冰川冻土沙漠图》的多年冻土面积为 $114.37 \times 10^4 \text{ km}^2$, 比 E-FROSTNUM 模拟结果多 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。两者多年冻土空间分布的相似指标总体精度为 86.1%, Kappa 系数为 0.71。这说明 E-FROSTNUM 模拟结果和《中国冰川冻土沙漠图》在表达多年冻土分

布的主要分布特性上是一致的。图 7c 是《中国冰川冻土沙漠图》与 E-FROSTNUM 模型的空间差异,其中“不一致 a”是表示《中国冰川冻土沙漠图》低估(即 E-FROSTNUM 判定为多年冻土),“不一致 b”表示《中国冰川冻土沙漠图》高估多年冻土(即 E-FROSTNUM 判定为季节冻土)。图 7c 显示自青藏高原东南—西北逐渐由低估—高估的趋势,这表明这些区域可能有复杂的局地因素影响冻土发育。事实上《中国冰川冻土沙漠图》使用的实测年平均地温数据主要是分布在青藏公路沿线,而从图 7c 可以看出青藏公路沿线是差异较小的区域,这从一定程度上证实了 E-FROSTNUM 的模拟能力。在藏北羌塘高原腹地,两者基本一致,可能是在此区域海拔较高,是主要的决定因素。在东南地形复杂区域,局地因素作用复杂,根据经验有较多的零星多年冻土分布,《中国冰川冻土沙漠图》没有模拟出这些区域的多年冻土分布。西南区域《中国冰川冻土沙漠图》对多年冻土分布的高估大概也因为类似的原因,据“青藏高原多年冻土本底调查”项目在改则等岛状冻土区的实地调查,以往我们对岛状多年冻土分布可能过于乐观。《中国冰川冻土沙漠图》采用的年平均地温是通过高程、经度、纬度回归得到,不具备反映高山区复杂地形的局地因素影响的能力,而 E-FROSTNUM 因为考虑了反映土壤热性质空间差异的参数,在一定程度上考虑了局地因素的影响。

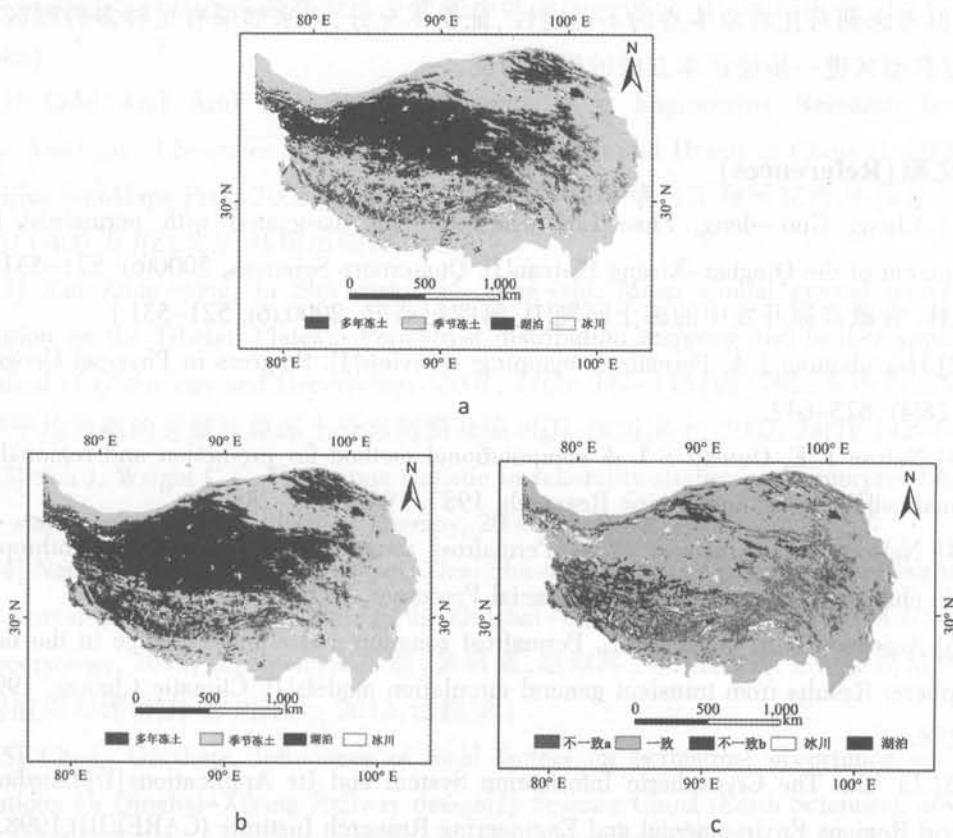


图 7 E-FROSTNUM 和《中国冰川冻土沙漠图》在青藏高原的对比。(a, E-FROSTNUM. b, 《中国冰川冻土沙漠图》。c,《中国冰川冻土沙漠图》与 E-FROSTNUM 差异分布)

表 4 E-FROSTNUM 和《中国冰川冻土沙漠图》在青藏高原的冻土面积

面积	E-FROSTNUM	冻土图	
	多年冻土/ 10^4km^2	94.79	114.37
	季节冻土/ 10^4km^2	157.42	137.90

4 结论

本文利用典型区实际冻土调查结果对扩展的地面冻结数模型进行土壤热参数的率定,结合气候、地形特征分区从而实现整个青藏高原的冻土制图。与原地面冻结数模型模拟结果、1:400 万《中国冰川冻土沙漠图》青藏高原冻土分布的对比表明,本文建议的方法可以实现更为精确的青藏高原多年冻土空间分布。原地面冻结数模型较适合于岛状冻土类型的区域,在东部复杂地形区域和多年冻土稳定发育的高寒区表现较差。而《中国冰川冻土沙漠图》不能精细体现典型区的冻土分布,在岛状冻土分布区和东部地形起伏较大地区大量高估多年冻土分布。本文模拟结果表明,青藏高原多年冻土 $94.79 \times 10^4 \text{ km}^2$,比《中国冰川冻土沙漠图》少约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

伴随着科技基础性工作专项“青藏高原多年冻土本底调查”项目的开展,将有更多的典型区可以对高原进行更为细致的分区模拟。尽管本文对模拟结果的可靠性有一定分析,但考虑到对比对象本身的不确定性,证据不充分,未来如果有足够多典型区,就可以通过典型区进一步论证本方法的模拟精度。

参考文献(References)

- [1] Cheng Guo -dong, Zhao Lin. The problems associated with permafrost in the development of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2000(6): 521–531.[程国栋,赵林. 青藏高原开发中的冻土问题[J]. 第四纪研究. 2000,(6): 521–531.]
- [2] Heginbottom J A. Permafrost mapping: a review[J]. Progress in Physical Geography, 2002, 26(4): 623–642.
- [3] Nelson F E, Outcalt S I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost[J]. Arctic and Alpine Research, 1987, 19(3): 279–288.
- [4] Nelson F E, Anisimov O A. Permafrost zonation in Russia under Anthropogenic climatic change[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1993, 4: 137–148.
- [5] Anisimov O A, Nelson F E. Permafrost zonation and climate change in the northern hemisphere: Results from transient general circulation models[J]. Climatic Change, 1997, 35: 241–258.
- [6] Li Xin. The Cryospheric Information System and Its Applications[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute (CAREERI), 1998.[李新. 冰冻圈信息系统及其应用研究 [D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,

1998.]

[7] Wang Zhi-xia. Applications of permafrost distribution models on the Qinghai-Tibet plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.[王之夏. 多年冻土分布模型在青藏高原的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.]

[8] Nan Zhuo-tong, Li Shu-xun, Cheng Guo-dong, et al. Extension of surface frost number model and its preliminary application to the Qinghai-Tibet plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1):89–95.[南卓铜, 李述训, 程国栋等. 地面冻结数模型在青藏高原上的应用[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1):89–95.]

[9] Shi Jian-zong, Nan Zhuo-tong, Shi Wei, et al. An information system for the permafrost background investigation over the Qinghai-Tibet plateau [J]. Remote Sensing Technology and Applications, 2010, 25(5): 725–732.[史健宗, 南卓铜, 石伟, 等. 青藏高原多年冻土本底调查信息系统[J]. 遥感技术与应用. 2010, 25(5): 725–732.]

[10] Wang Zhi-xia, Nan Zhuo-tong, Zhao Lin. The applicability of MODIS Land Surface Temperature Products to simulating the permafrost distribution over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33 (1): 132–143.[王之夏, 南卓铜, 赵林. MODIS 地表温度产品在青藏高原冻土模拟中的适用性评价 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 132–143.]

[11] Cold And Arid Regions Environmental And Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences. Map of Glacier, Permafrost and Desert in China (1:4,000,000) [Z]. Beijing:SinoMaps Press,2005.[中国科学院寒区旱区环境与工程研究所. 中国冰川冻土沙漠图(1:400 万)[Z]. 北京:地图出版社,2005.]

[12] Nan Zhuo-tong, Li Shu-xun, Liu Yong-zhi. 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.]

[13] Sim J, Wright C C. The kappa statistic in reliability studies: use, interpretation, and sample size requirements[J]. Physical Therapy, 2005, 85(3): 257–268.

[14] Nan Zhuo-tong, Huang Pei-pei, Zhao Shu-ping, et al. Applications and evaluations of five permafrost distribution models to the Qinghai-Tibet plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, accepted.[南卓铜, 黄培培, 赵淑萍, 等. 五个冻土分布模型在青藏高原的应用和评价[J]. 冰川冻土, 2012, 已接受.]

[15] Cheng Guodong. Influences of local factors on permafrost occurrence and their implications for Qinghai-Xizang Railway design[J]. Science China (Earth Sciences), 2004, 47 (4): 704–709.

[16] Liu Min, Tang guo-an, Wang Chun, et al. Analysis of topographic index variance

based on a small tested loess watershed in different evolution periods[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(2):56–60.[刘敏, 汤国安, 王春等. 黄土小流域不同发育阶段地形指数变异特征分析[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2):56–60.]

[17] Liu Xin-hua, Yang Qin-ke, Tang Guo-an. Extraction and application of relief of China based on DEM and GIS method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(1): 57–62.[刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1):57–62.]