

冰川冻土
Journal of Glaciology and Geocryology
ISSN 1000-0240, CN 62-1072/P

《冰川冻土》网络首发论文

题目: 基于地理探测器的青藏高原多年冻土分布影响因子分析
作者: 肖瑶, 赵林, 邹德富, 刘世博, 马露, 应雪, 刘艺阒
收稿日期: 2019-04-24
网络首发日期: 2019-12-27
引用格式: 肖瑶, 赵林, 邹德富, 刘世博, 马露, 应雪, 刘艺阒. 基于地理探测器的青藏高原多年冻土分布影响因子分析[J/OL]. 冰川冻土.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.p.20191226.1102.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0063

XIAO Yao, ZHAO Lin, ZOU Defu, et al. Analyses of the influence factors of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau based on geo-graphical detector[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): xxxx - xxxx. [肖瑶, 赵林, 邹德富, 等. 基于地理探测器的青藏高原多年冻土分布影响因子分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): xxxx - xxxx.]

基于地理探测器的青藏高原多年冻土分布影响因子分析

肖瑶^{1,2}, 赵林¹, 邹德富¹, 刘世博^{1,2}, 马露^{1,2}, 应雪^{1,2}, 刘艺阒^{1,2}

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 青藏高原冰冻圈观测研究站, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 多年冻土的分布会受到局地地质、地形地貌和地表覆被等因素的影响。为探究各因子对多年冻土分布的影响强弱, 选择青藏高原五个典型多年冻土区为研究区, 基于 MODIS 和 SRTM DEM 数据提取研究区内 2003 - 2012 年平均地表温度、NDVI、地表反照率、积雪日数和坡度、坡向等因子, 并采用地理探测器模型研究了各因子对研究区多年冻土分布的影响程度及差异。结果表明: 在所有研究区内, 地表温度是影响多年冻土分布最强的因子, 其次为积雪日数。随着空间尺度范围的增大, 坡度和坡向对多年冻土分布的影响逐渐减弱, 地表温度的影响则逐渐增强。交互探测结果显示两个因子交互作用对多年冻土分布的影响程度都要大于单因子作用下的影响程度。本研究明确了青藏高原多年冻土分布的区域差异规律, 为不同尺度多年冻土分布制图提供理论基础。

关键词: 青藏高原; 多年冻土分布; 地理探测器; q 值; 影响因子

文献标志码: A 文章编号: 1000-0240(2019)05-0xxx-11

0 引言

从冻土物理学角度出发, 多年冻土是岩石圈-土壤-大气圈热质交换过程中相互作用形成和发展的^[1], 自然界的许多因素参与了这一过程。在全球尺度上, 气候的地带性规律控制着多年冻土的变化和分布差异; 在区域尺度和局地尺度上, 植被、土壤、积雪以及微地形等的差异对多年冻土分布的影响在一定条件下, 会超过大的气候背景成为驱动多年冻土空间分布的主要因素, 造成多年冻土在空间上的非气候带分布规律^[2-6]。青藏高原发育着全球中低纬度地区海拔最高、面积最大的多年冻土区^[7], 其多年冻土面积达 $1.06 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[8], 在区域气候和地质条件等因素的综合影响下, 青藏高原多年冻土分布特征具有显著的空间差异。因此, 研究多年冻土分布的影响因素是区域冻土研究的重要内

容之一, 建立多年冻土空间分布与环境因子之间的关系也是多年冻土预测、建模必不可少的基础。

温度是影响多年冻土分布的主要因素, 是驱动土壤热状态的主要因子^[9-10]。目前, 对青藏高原多年冻土分布的研究主要通过模型建立温度与多年冻土分布之间的关系来实现。如冻土制图模型中, 传统的经验统计模型(高程模型、年平均地温模型)以及简单半经验-半物理机制模型[冻结数模型、TTOP(Top Temperature Of Permafrost)模型]都将海拔、气温或地温作为驱动, 采用多年冻土分布下界或者设定阈值来判定多年冻土的分布范围^[11-14], 但是, 这些模型模拟过程中未充分考虑影响多年冻土分布的其他局地因素。而程国栋^[3]发现坡度、坡向等局地因素可以通过影响地温进而影响多年冻土的空间分布。Keller 等^[15]提出的山地多年冻土分布模型(PERMAKART)考虑到坡度和坡向等地形

收稿日期: 2019-04-24; 修订日期: 2019-09-15

基金项目: 南京信息工程大学人才启动经费(2018r075); 国家自然科学基金项目(41701073)资助

作者简介: 肖瑶(1995 -), 男, 湖南邵阳人, 2017 年在西北师范大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事冻土模拟和制图研究. E-mail: xiaoyao17@mails.ucas.edu.cn

通信作者: 赵林, E-mail: linzhao@lzb.ac.cn.

因子的影响,模拟了瑞士地区山地多年冻土的分布。Frauenfelder 等^[16]在山地多年冻土分布模型基础上考虑到积雪、植被等因素的影响,模拟了阿尔卑斯山地区多年冻土分布。以上研究结果都是建立在足够的调查资料基础上,但实际上大部分多年冻土分布于气候恶劣、可达性差的地区,调查资料稀少,而随着遥感技术的应用和发展,科学家们可通过卫星遥感数据快速的获取不同区域的下垫面信息,如 Käab^[5]利用数字地形模型(DTM)、可见光遥感以及微波遥感等数据源,综合考虑与多年冻土分布密切相关的因素,对多年冻土灾害进行评估和管理。Etzelmüller^[17]考虑影响多年冻土分布相关的因子来确定外蒙古库苏古尔地区多年冻土存在的可能性大小。总的来说,局地因素通过影响地气能量交换和到达地表的太阳辐射,从而造成多年冻土空间分布上的差异^[18-20],而且不同区域环境下,其主导影响因子也有较大差异。同理,相同因子作用在不同地区也会造成对多年冻土分布的差异。目前的研究多针对各因子如何影响多年冻土分布,但是如何定量描述驱动因子对多年冻土分布影响程度,尤其是地表局地因素对多年冻土分布影响的量化研究还存在不足。地理探测器能够探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法,其基于如果某个自变量对某个因变量有重要影响,那

么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性^[21],其不仅可以定量分析影响多年冻土空间分布各因子的驱动力相对大小,还能探测各驱动因子的交互作用。目前,地理探测器模型能够应用到自然科学、环境科学、社会科学等各个方面^[22-23]。

确定多年冻土的主要影响因子及贡献率是构建多年冻土空间分布和预测模型的基础。本文利用可见光和热红外遥感技术获取与多年冻土分布有关的地表温度、植被、积雪和地表反照率等数据,利用地理探测器模型探测不同因子对各区域多年冻土分布的影响程度,以及对影响多年冻土空间分布因子的强弱进行定量分析,从而为不同环境条件下多年冻土分布规律和区域多年冻土建模制图提供决策。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

青藏高原冻土分布图采用 Zou 等^[8]利用 TTOP 模型的模拟结果。在此基础上选取五个研究区,分别为东部温泉地区、西部西昆仑地区、南部改则地区、北部阿尔金地区和中部不冻泉地区。这些区域均分布于多年冻土与季节冻土的过渡地带(图 1),多为不连续多年冻土。

各研究区内地形和气候特征存在较大差异,温泉地区海拔介于 3 430~5 300 m 之间,地形以山地

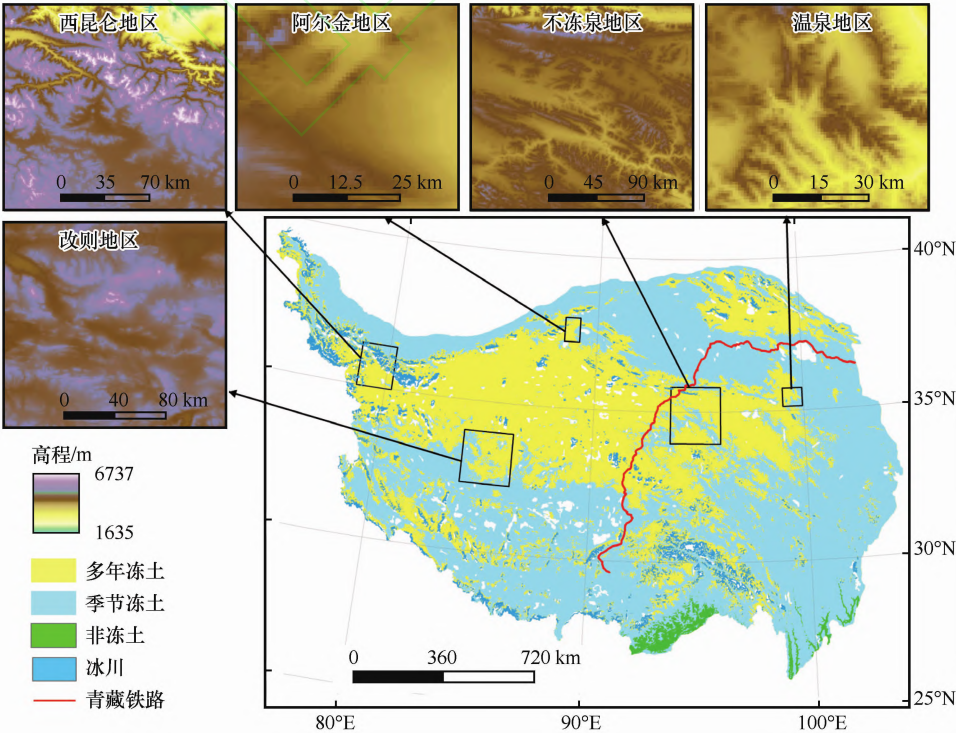


图 1 研究区分布

Fig. 1 Spatial distribution of the research area on the Qinghai-Tibet Plateau

和丘陵为主，区域内年平均气温在 1.3 ℃ 以下，年降水量约 400 ~ 600 mm^[24-25]。不冻泉地区地形呈现明显起伏，青藏铁路斜穿而过，区内海拔多在 4 000 m 以上，气象站资料显示年平均温度为 -6.2 ℃，年平均降水量为 270 mm^[26]。阿尔金地区以丘陵和山间盆地为主，地势从西南向东北呈现降低趋势，海拔在 3 400 ~ 5 400 m 之间，年平均温度低于 3.6 ℃，年降水稀少，极为干旱^[27]。西昆仑地区地势总体表现为东北低，中部多为高山，南部较缓，区内海拔除去图中东北区域外，多集中在 5 000 m 以上，为研究区内平均海拔最高的区域，冰川分布广泛，年平均气温在 -4.5 ℃ 以下，年平均降水量在 60 ~ 120 mm 之间^[28]。改则地区地势大致为西北高，东南低，无明显起伏，海拔在 4 400 ~ 6 300 m 之间，区内地形以山地和山间盆地为主，区内年平均温度为 0 ℃ 左右，年平均降水量为 150 mm^[29]。

1.2 数据

地表温度作为地表能量平衡中的主要参数，是影响多年冻土分布的主要因子，而其他局域因子也可以通过影响地表能量和辐射平衡，从而影响多年冻土的空间分布。本研究以遥感反演产品为基础，选取对多年冻土分布影响较大的六个因子，包括地表温度、积雪、植被、地表反照率、坡度和坡向。青藏高原上，尤其在多年冻土区，植被以高寒草地为主，冬季植被较少，且冬季容易形成稳定的积雪，因此采用 7 - 9 月 NDVI 和冬半年积雪日数为植被和积雪的指标。数据指标和数据来源见表 1，其中地表温度、积雪、植被和反照率均采用 MODIS 数据产品，该产品来自于美国国家航空航天局 (NASA)，数据下载网址为 <https://search.earthdata.nasa.gov/>，时间范围为 2003 - 2012 年。

1.3 方法与模型

本研究利用地理探测器模型，确定不同因子对各研究区多年冻土分布的影响程度。地理探测器模型^[21,33]能探测同一区域内变量的相似性、不同区域间变量的差异性。假设自变量 X 和因变量 Y 的空间分布趋于一致，那么它们之间存在统计关联性，进而可以揭示其因果关系。两个变量空间分布的一致性、空间分异性可以用地理探测器中的 q 值度量，而 q 值可直接用地理探测器模型计算 (<http://www.geodetector.org/>)。本文所使用地理探测器功能包括^[34]：(1) 因子探测；(2) 交互作用探测，地理探测器模型的公式表达如下：

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2$$

(1)

式中： h 为影响多年冻土分布因子的分类， $h \in [1, L]$ ； N_h 为层 h 的单元数， N 为研究区全部单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别是变量某一层 h 方差和全区方差。 $q \in [0, 1]$ ， q 值越大说明分层异质性越明显；由于多年冻土分布是由于各个因素共同作用的结果， q 值越大表示影响因子对多年冻土分区的解释力越强，相反则越弱； $q = 1$ 时表明影响因子完全控制多年冻土的空间分布； $q = 0$ 时表明多年冻土的空间分布不受该因子影响。本研究中 Y 为多年冻土， X 为影响因子，基于地理探测器模型，依据不同区域多年冻土分布的结果，通过计算并比较各因子 q 值大小，分析其对多年冻土的影响程度。

交互探测分别计算因子 X_1 和 X_2 的 q 值 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$ ，然后计算因子 X_1 和 X_2 交互作用的 q 值 $q(X_1 \cap X_2)$ ；根据 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 和 $q(X_1 \cap X_2)$ 的关系，交互作用可分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强 (表 2)。本文基于交互作用的探测结果，评估在双因子共同作用下影响多年冻土空间分布的能力是否增强^[21,35]。

表 1 数据来源
Table 1 Sources of the used data

数据	指标	描述
地表温度	全天地表温度	采用基于物理的白天/黑夜地表温度反演的 MOD11 系列遥感数据集。用其包含的白天地表温度和晚上地表温度来计算全天地表温度 ^[10,30]
积雪	冬半年积雪日数	来源于中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 Hao ^[31] 制作的 MODIS 005 版本和 IMS 数据集的青藏高原融合逐日无云积雪产品数据集
植被	7 - 9 月 NDVI	MOD13A2 16d 植被指数合成产品
反照率	地表短波反照率	MCD43A4 数据集，利用其 1 ~ 7 波段的反照率计算短波地表反照率 ^[32]
DEM	坡度、坡向	在 ArcGIS 中使用 surface analysis 工具，基于 30 m 分辨率的 DEM 数字高程模型数据，提取坡度和坡向

表2 交互作用关系

Table 2 Redefined interaction relationships

关系描述	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \text{Min}[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱
$\text{Min}[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \text{Max}[q(X1), q(X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \text{Max}[q(X1), q(X2)]$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

2 结果与分析

2.1 典型多年冻土区影响因子对比与分析

对温泉地区、西昆仑地区、改则地区、阿尔金地区和不冻泉地区五个研究区的多年冻土分布以及研究区内 2003 – 2012 年平均地表温度 (LST)、冬

半年积雪日数 (ASW)、7 – 9 月植被指数 (NDVI)、地表短波反照率 (Albedo)、坡度 (Slope) 和坡向 (Aspect) 进行分类并可视化 (图 2)。

山区和低温区域容易形成积雪，其地表反照率较高^[36]。高海拔地区其植被覆盖较低^[37]，其地表反照率较高。由于冰川和湖泊具有高反照率、低 NDVI 等特点，因此去除冰川和湖泊的影响，对研究区内各因子的箱线图 (图 3) 和其空间分布 (图 2) 进行对比分析：西昆仑地区高度差最大，同时其地表温度、冬半年积雪日数和地表反照率相差也最大，区内年平均地表温度为研究区内最低 (−0.68 ℃)，冬半年平均积雪日数最大 (46 d)，年平均地表反照率最高 (0.27)。不冻泉地区年平均地表温度为 −0.38 ℃，仅高于西昆仑地区；温泉地区虽然年平均地表温度仅低于改则地区，但区内多山地，其海拔相差也较大，最高坡度和平均坡度为研究区

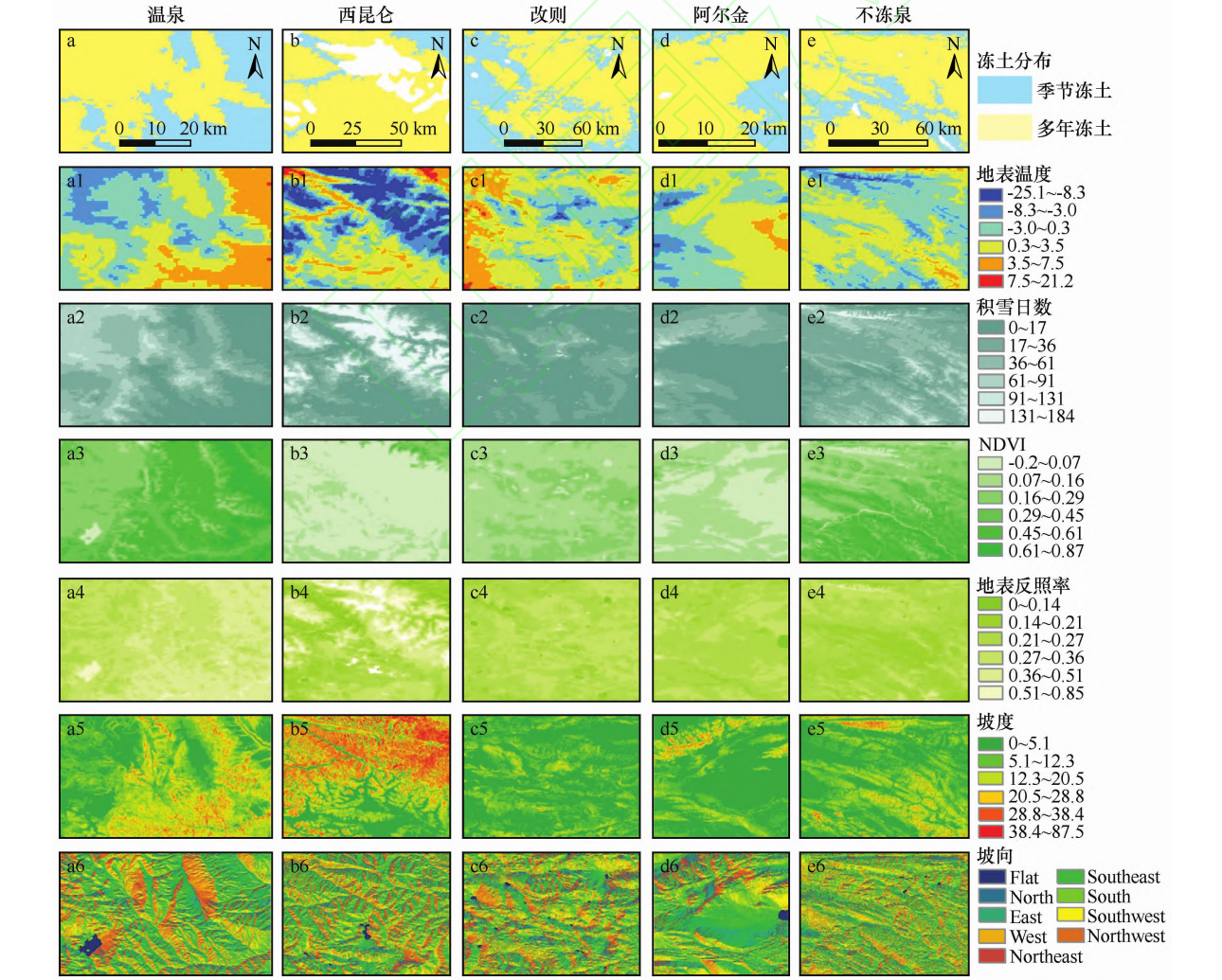


图2 影响因子的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of influencing factors

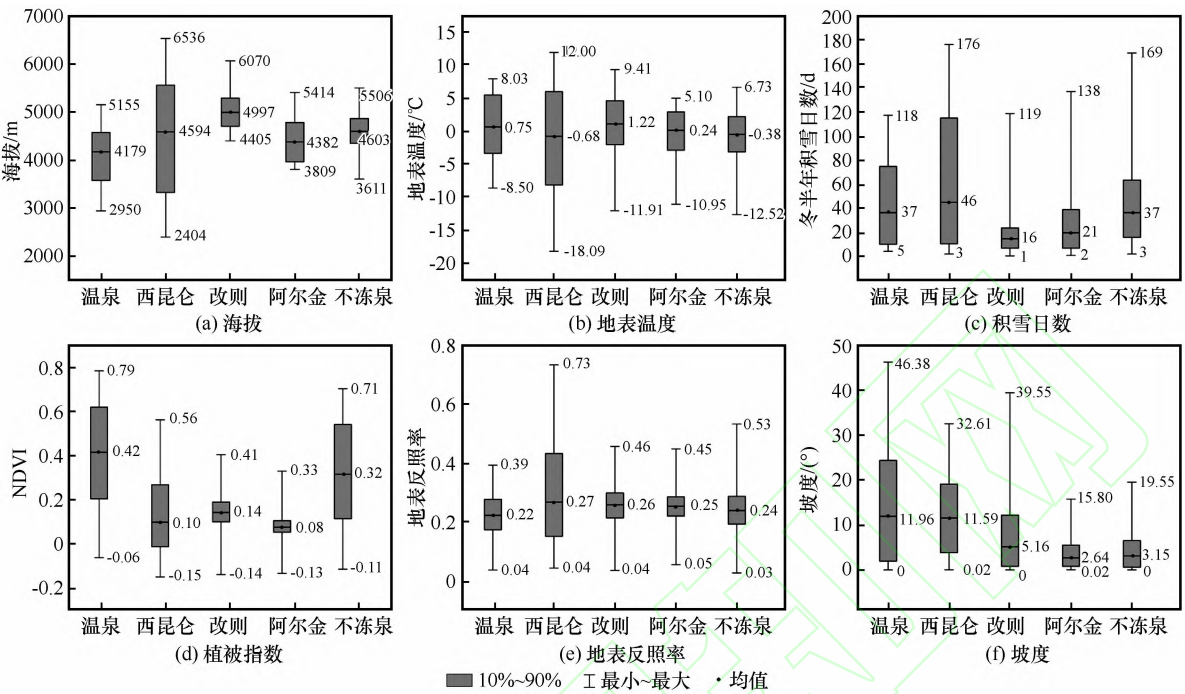


图3 不同区域环境因子箱线图

Fig. 3 The Box-plot of environment factors in different areas

内最高，从而形成温泉地区和不冻泉地区冬半年平均积雪日数(37 d)仅次于西昆仑地区，但是由于区内降水量高于其他研究区(在青藏高原，降水量与植被成正相关^[38])，而造成这两个地区夏季年平均NDVI 远高于其他研究区，分别为0.42 和0.32，且集中分布在0.2 以上，使其区内地表反照率低于其他研究区；改则地区和阿爾金地区年地表反照率特征相似，多集中在0.2~0.3 之间；改则地区年平均地表温度为研究区内最高(1.22 °C)，其冬半年平均积雪日数(16 d)为研究区内最低，其平均海拔为研究区最高(4 997 m)；阿尔金地区海拔虽然多分布在5 000 m 以下，但其降水量为研究区内最低，造成NDVI 为研究区最低，且集中在0.1 以下。

2.2 单因子对典型区多年冻土分布的影响

气候背景直接影响到地表温度^[39]，各种地质

地理因素对多年冻土的影响主要表现为影响到达地面的热流大小^[1]，其相互作用下导致的地气系统能量变化在空间上的不同，造成多年冻土在空间上的分异^[40]。在不同区域，各局地因素对多年冻土分布的影响程度也有较大差异。在选取的因子中，探测结果(表3)显示地表温度都为影响各区域多年冻土分布的主要因素，并结合相关分析得到研究区各因子与多年冻土分布之间的相关性(表4)分析讨论得出地表温度越低的区域，多年冻土分布越广泛。根据探测的各因子 q 值，以0.3 为标准进行划分，探讨各局地因素对多年冻土分布的影响强弱，表明：积雪日数、NDVI 和地表反照率对温泉地区和西昆仑地区多年冻土分布影响较大，改则地区和不冻泉地区影响多年冻土分布较强的因子为积雪日数，阿尔金地区多年冻土分布除了受地表温度影响较强，其他局地因素都表现为弱影响。

表3 驱动因子探测

Table 3 The q -statistic of geographical factors

区域	LST	ASW	NDVI	Albedo	Slope	Aspect
温泉	0.723	0.719	0.352	0.408	0.053	0.023
西昆仑	0.549	0.453	0.405	0.302	0.054	0.008
改则	0.430	0.332	0.093	0.104	0.007	0.006
阿尔金	0.453	0.084	0.008	0.012	0.025	0.015
不冻泉	0.542	0.300	0.007	0.075	0.003	0.007

表 4 相关分析
Table 4 The r coefficient of Correlation analysis

区域	LST	ASW	NDVI	Albedo	Slope	Aspect
温泉	-0.806	0.736	-0.650	0.567	-0.220	0.102
西昆仑	-0.697	0.557	-0.594	0.508	-0.104	0.023
改则	-0.631	0.417	0.297	0.319	0.030	0.023
阿尔金	-0.630	0.341	0.266	0.106	0.183	0.067
不冻泉	-0.643	0.438	0.034	0.265	-0.037	-0.018

植被是影响多年冻土热状况的主要因素之一，植被能减少到达地表的太阳辐射，降低地面温度差，减少了进入土壤中的热量^[1]。NDVI 对温泉地区 和西昆仑地区的多年冻土分布影响较强，而对改则地区、阿尔金地区和不冻泉地区的多年冻土分布影响较弱。分析其原因为：植被对地表层热状况影响取决于所在地区植被分布特征^[41]，在温泉地区 和西昆仑地区，植被与地表温度的空间分布存在相似性，即地表温度高的地区，植被发育越好，与两 地主要以山地地形为主有很大的联系，而地表温度

特征与多年冻土的分布具有明显的一致性。而在改则地区、阿尔金地区和不冻泉地区，山地地形分布不集中，NDVI 与地表温度在空间上的分布无规律。NDVI 和多年冻土的分布关系表现为在温泉和西昆 仑地区，NDVI 越小的区域，多年冻土分布越广泛， 而在其他地区表现为 NDVI 越大的区域，多年冻土 分布越广泛。

积雪的作用主要有：阻碍地表与大气之间热交 换起隔热作用、使一部分热量不能达到地表起冷却 作用、融化时吸收大量的热量起冷却作用，高原上

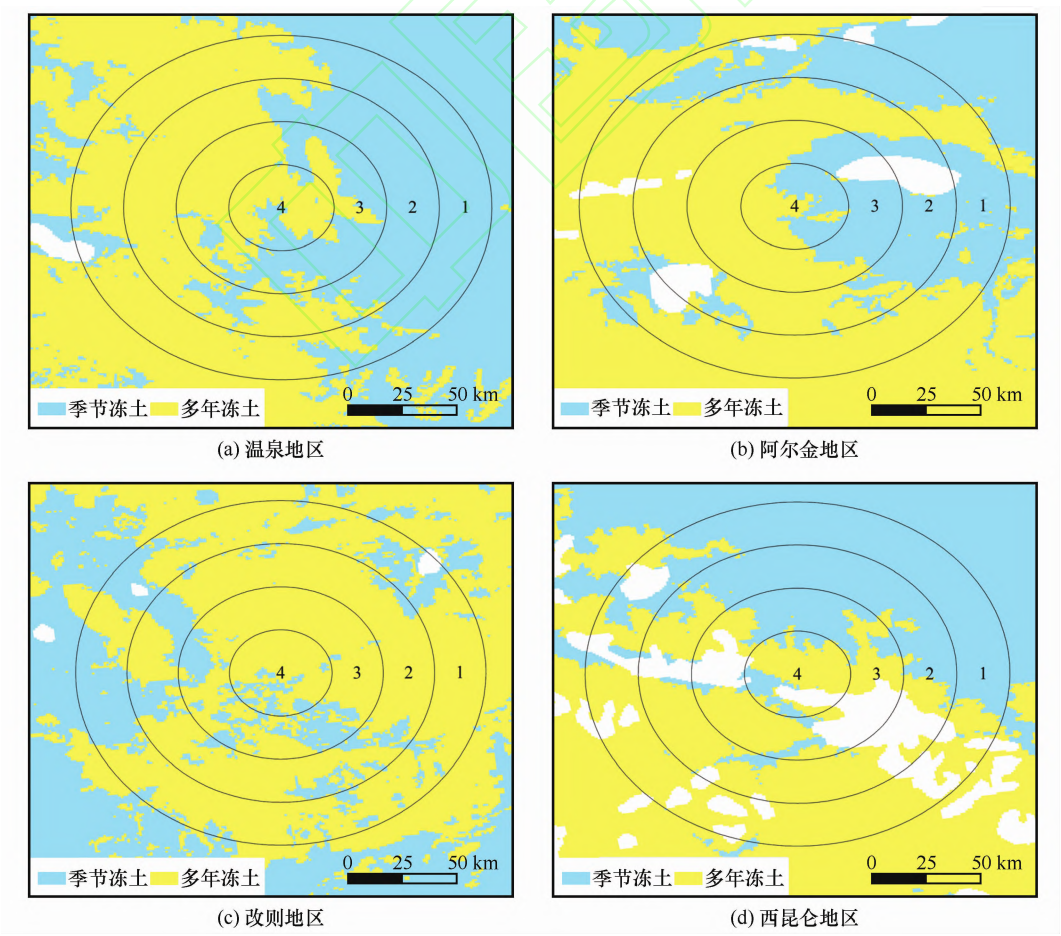


图 4 温泉地区不同尺度范围
Fig. 4 The different scales in research area

不同区域雪盖对浅层地温的影响存在较大差异，冷季积雪的综合作用是削弱地表的冷却作用，对浅层地温起到了保温作用^[1,41]。积雪对研究区多年冻土分布的影响表现为：温泉地区和西昆仑地区影响最强，不冻泉地区和改则地区次之，阿尔金地区影响最弱。分析其原因为：阿尔金地区平地较多且分布集中，温泉地区和西昆仑地区多为山地地形，海拔相差大；不冻泉地区和改则地区平地分布虽然多，但不集中，积雪日数特征和多年冻土分布在空间上表现为积雪日数越多的区域多年冻土分布越广泛。

地表反照率是一种综合指标，受到NDVI和积雪的影响，积雪和NDVI在温泉地区和西昆仑地区对多年冻土分布的影响较强，造成地表反照率对温泉地区和西昆仑地区的多年冻土分布影响也较强，对改则地区、阿尔金地区和不冻泉地区的影响较弱。

本研究使用的各遥感数据产品和多年冻土分布数据分辨率都为1 km，以及各个研究区选取的尺度范围内，坡度和坡向对研究区多年冻土分布的影响都表现为弱影响。因此，尺度问题在本文研究中不可忽略。

2.3 不同尺度下因子对多年冻土分布的影响

以温泉地区、阿尔金地区、改则地区和西昆仑地区不同半径内的范围作为不同区域尺度(图4、

表5)，探究不同尺度下各局地因子对多年冻土分布的影响程度(图5)。

表5 不同尺度划分依据

Table 5 The principle of different scales		
尺度大小	范围(参看图4)	半径/km
A	4	20
B	3+4	40
C	2+3+4	60
D	1+2+3+4	80

在选择四个实验区域内，可以发现随着尺度范围的增大，地表温度对多年冻土分布的影响程度都有明显的增强趋势，侧面反应了在大尺度上，多年冻土的分布主要受温度影响。局地因素在不同区域，随着尺度的变化，对多年冻土分布的影响有着不同的规律。而对于坡度和坡向，随着尺度范围的增大，其对多年冻土分布的影响程度都呈现减弱趋势。坡向和坡度直接影响到地面接收太阳辐射的强度。而青藏高原的太阳辐射强烈，致使山坡方位作用增强，因此在小范围尤其是山地多年冻土分布时，各局地因素与坡度和坡向的共同作用不可忽略。

2.4 双因子对典型区多年冻土分布的影响

使用交互探测分析两个因子共同作用下对不同

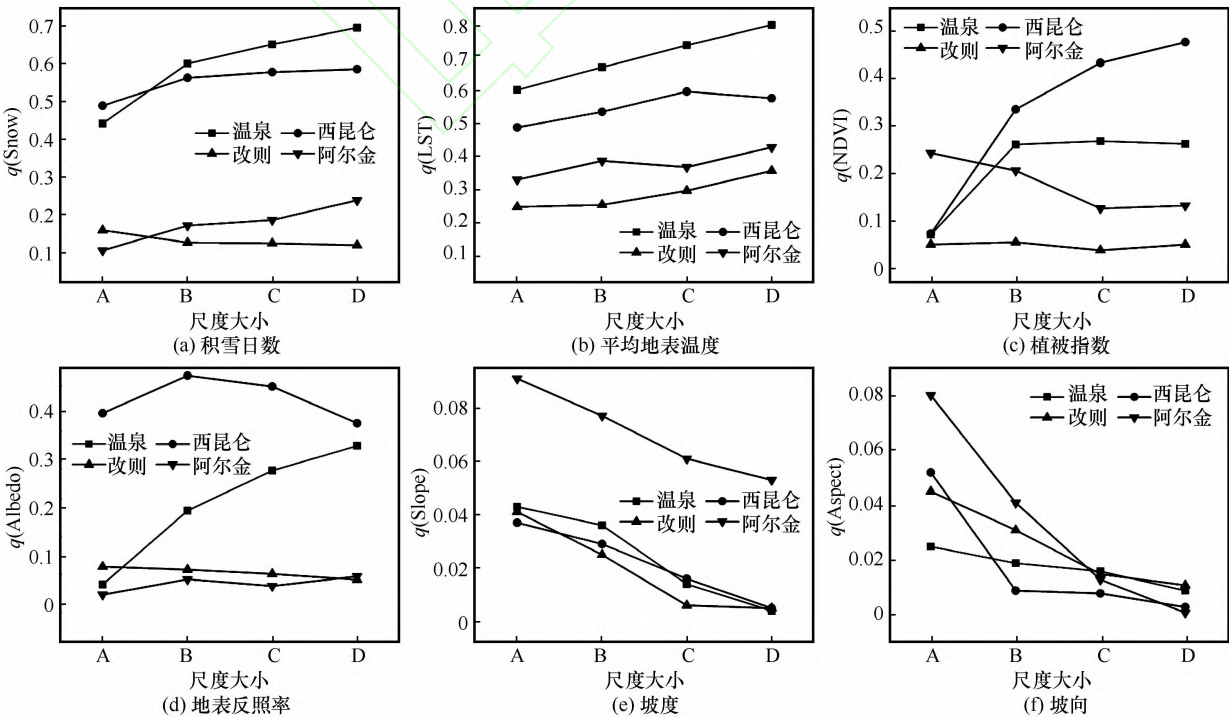


图5 不同尺度下的q值探测

Fig.5 The q-statistic of geographical factors in different scales

表 6a 各地区交互探测和类型

Table 6a The interaction relationships in research areas

区域	$C = A \cap B$	A	B	A + B	关系	交互类型
WQ	Slope $\cap$ LST	0.053	0.723	0.729	$C < A + B, C > A, B$	E
	Aspect $\cap$ ASW	0.023	0.719	0.738	$C < A + B, C > A, B$	E
XKL	Slope $\cap$ LST	0.054	0.549	0.590	$C < A + B, C > A, B$	E
	Aspect $\cap$ LST	0.008	0.549	0.561	$C > A + B$	NE
GZ	Slope $\cap$ LST	0.007	0.430	0.445	$C > A + B$	NE
	Aspect $\cap$ LST	0.006	0.430	0.444	$C > A + B$	NE
AEJ	NDVI $\cap$ LST	0.008	0.453	0.454	$C < A + B, C > A, B$	E
	Slope $\cap$ LST	0.015	0.453	0.454	$C < A + B, C > A, B$	E
BDQ	Aspect $\cap$ LST	0.007	0.542	0.545	$C < A + B, C > A, B$	E
	Slope $\cap$ ASW	0.003	0.300	0.327	$C > A + B$	NE

交互类型: E(双因子增强), NE(非线性增强)

表 6b 各地区交互探测和类型

Table 6b The interaction relationships in research areas

区域	$C = A \cap B$	A	B	A + B	关系	交互类型
WQ	LST $\cap$ ASW	0.723	0.719	0.779	$C < A + B, C > A, B$	E
	LST $\cap$ Albedo	0.723	0.408	0.761	$C < A + B, C > A, B$	E
	LST $\cap$ NDVI	0.723	0.352	0.753	$C < A + B, C > A, B$	E
XKL	LST $\cap$ NDVI	0.549	0.405	0.691	$C < A + B, C > A, B$	E
	LST $\cap$ Albedo	0.549	0.302	0.592	$C < A + B, C > A, B$	E
	ASW $\cap$ NDVI	0.453	0.405	0.590	$C < A + B, C > A, B$	E
GZ	LST $\cap$ NDVI	0.430	0.093	0.467	$C < A + B, C > A, B$	E
	LST $\cap$ Albedo	0.430	0.104	0.457	$C < A + B, C > A, B$	E
	LST $\cap$ ASW	0.430	0.332	0.455	$C < A + B, C > A, B$	E
AEJ	LST $\cap$ ASW	0.453	0.084	0.480	$C < A + B, C > A, B$	E
	LST $\cap$ Albedo	0.453	0.012	0.457	$C < A + B, C > A, B$	E
	LST $\cap$ Aspect	0.453	0.015	0.456	$C < A + B, C > A, B$	E
BDQ	LST $\cap$ NDVI	0.542	0.007	0.553	$C > A + B$	NE
	LST $\cap$ Albedo	0.542	0.075	0.551	$C < A + B, C > A, B$	E
	LST $\cap$ Slope	0.542	0.003	0.549	$C > A + B$	NE
	LST $\cap$ ASW	0.542	0.300	0.549	$C < A + B, C > A, B$	E

交互类型: E(双因子增强), NE(非线性增强)

区域多年冻土分布的影响程度，并对单因子探测的结果进行对比，选取各个区域的交互作用最强的前三位(表 6a)和每个区域内与该因子最大的交互值与交互类型(表 6a, 表 6b)，可以得出：双因子交互作用下的影响程度都表现为双因子增强和非线性增强。交互作用主要揭示影响多年冻土分布的因子在共同作用下的影响程度要大于任何一个单一因子的影响程度。在研究区内，各交互作用最强的都是与地表温度的交互，在西昆仑地区、改则地区和不冻

泉地区，交互作用最强的为地表温度和 NDVI 的交互，在温泉地区和阿尔金地区，交互作用最强的为地表温度和积雪日数。说明各个局地因子共同作用下，通过直接或间接的影响地表浅层热状况，从而影响所在区域内地表温度造成多年冻土分布的差异。

3 结论

多年冻土的空间分布是多个因素共同作用的结

果, 大的气候背景是多年冻土分布的主要控制因素, 但是在局域尺度上, 植被、积雪、地形等的差异会对冻土分布的影响也起到重要作用。本研究基于地理探测器模型, 以地表温度、NDVI、积雪日数、地表反照率、坡度和坡向等影响因子为自变量, 青藏高原典型区多年冻土为因变量, 分析各因子以及双因子间交互作用对多年冻土分布的影响程度, 结论如下:

(1) 因子探测结果中, 五个典型多年冻土研究区内, 地表温度为影响多年冻土分布的最主要因子, 其 q 值均大于 0.4; 交互探测结果表明两个变量相互作用下对多年冻土的分布影响程度要大于一种变量的独立影响, 增强类型为双因子增强和非线性增强;

(2) 本文选取的各局域因子对研究区内多年冻土分布的影响不同。温泉地区和西昆仑地区积雪日数、NDVI 和地表反照率的影响最强; 改则地区和不冻泉地区积雪日数的影响最强; 阿尔金地区各局地因子的影响都比较弱。此外, 坡度和坡向在研究区为弱影响因子, q 值均小于 0.1。同一因子对不同研究区多年冻土分布的影响也存在较大差异, 其差异与各区域该因子分布特征有关。

(3) 探测不同区域尺度下各因子对多年冻土分布的影响程度, 结果表明随着尺度的增加, 地表温度的影响程度逐渐增大, 反应了在大尺度上温度是影响多年冻土分布的主要因素, 而坡度和坡向的影响程度逐渐减少, 表明在小尺度范围内尤其是山地多年冻土分布研究时, 坡度和坡向等局域因素对多年冻土分布的影响不可忽视。

本文目的是使用地理探测器模型探究不同因子对冻土分布的影响程度, 只选取了部分影响因子, 如果需要进行进一步深入探讨影响多年冻土分布的局域因素, 需要加入更多局域因子如土壤含水量、积雪厚度等, 因变量可以选取活动层厚度等与冻土密切相关的参数, 灵活利用地理探测器模型和其他方法, 综合考虑尺度问题, 研究局地因素对多年冻土分布的影响强弱, 为区域冻土模拟和制图提供更好的决策基础。

参考文献 (References):

[1] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. *Geocryology in China* [M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.]

[2] Camill P, Clark J S. Climate change disequilibrium of boreal permafrost peatlands caused by local processes [J]. *The Ameri-*

can Naturalist, 1998, 151(3): 207–222.

[3] Cheng Guodong. Influences of local factors on permafrost occurrence and their implications for Qinghai-Xizang Railway design [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 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: 地球科学), 2003, 33(6): 602–607.]

[4] 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-气候关系模型评述 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 315–321.]

[5] Kääb A. Remote sensing of permafrost-related problems and hazards [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008, 19(2): 107–136.

[6] Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, et al. Temporal and spatial variations of the active layer along the Qinghai-Tibetan Highway in a permafrost region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(30): 2864–2871. [李韧, 赵林, 丁永建, 等. 青藏公路沿线多年冻土区活动层动态变化及区域差异特征 [J]. 科学通报, 2012, 57(30): 2864–2871.]

[7] Jin Huijun, Li Sunxhu, Wang Shaoling, et al. Impacts of climatic change on permafrost and cold regions environments in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000(2): 161–173. [金会军, 李述训, 王绍令, 等. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响 [J]. 地理学报, 2000(2): 161–173.]

[8] Zou D, Zhao L, Yu S, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(6): 2527–2542.

[9] Shi Yaya, Yang Chengsong, Che Tao. Accuracy verification of the Tibetan Plateau permafrost map based on MODIS LST product [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 70–78. [石亚亚, 杨成松, 车涛. MODISLST 产品青藏高原冻土图的精度验证 [J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 70–78.]

[10] Zou Defu, Zhao Lin, Wu Tonghua, et al. Assessing the applicability of MODIS land surface temperature products in continuous permafrost regions in the central Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2): 308–317. [邹德富, 赵林, 吴通华, 等. MODIS 地表温度产品在青藏高原连续多年冻土区的适用性分析 [J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 308–317.]

[11] 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.]

[12] Riseborough D W. The mean annual temperature at the top of permafrost, the TTOP model, and the effect of unfrozen water [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2002, 13(2): 137–143.

[13] Li X, Cheng G. A GIS-aided response model of high-altitude permafrost to global change [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1999, 42(1): 72–79.

[14] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Cheng Guodong, et al. Surface frost number model and its application to the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 89–95. [南卓铜, 李述训, 程国栋, 等. 地面冻结数模型及其在青藏高原的应用 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 89–95.]

[15] Keller F. Automated mapping of mountain permafrost using the

- program PERMAKART within the geographical information system ARC/INFO [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1992, 3(2): 133–138.
- [16] Frauenfelder R, Allgwer B, Haeberli W, et al. Permafrost investigations with GIS: a case study in the Flletschhorn area, Wallis, Swiss Alps [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost, Yellowknife, Canada, Collection Nordica. 1998, 57: 291–295.
- [17] Etzelmann R, Heggem E S F, Sharkhuu N, et al. Mountain permafrost distribution modelling using a multi-criteria approach in the Hovsgol area, northern Mongolia [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2006, 17(2): 91–104.
- [18] Dozier J, Painter T H. Multispectral and hyperspectral remote sensing of alpine snow properties [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2004, 32: 465–494.
- [19] Kelley A M, Epstein H E, Walker D A. Role of vegetation and climate in permafrost active layer depth in arctic tundra of northern Alaska and Canada [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(S1): 269–274.
- [20] Li Wangping, Zhao Lin, Wu Xiaodong, et al. Distribution of soils and landform relationships in the permafrost regions of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(23): 2216–2226. [李旺平, 赵林, 吴晓东, 等. 青藏高原多年冻土区土壤-景观模型与土壤分布制图 [J]. *科学通报*, 2015 (23): 2216–2226.]
- [21] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and perspective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116–134.]
- [22] Zhang Jinxi, Gong Jie, Liu Dongqing. Dynamics and driving factors of landscape fragmentation based on GeoDetector in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(8): 1370–1378. [张金茜, 巩杰, 柳冬青. 地理探测器方法下甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析 [J]. *地理科学*, 2018, 38(8): 1370–1378.]
- [23] Wang Huan, Gao Jiangbo, Hou Wenjuan. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types of geomorphology in karst areas: based on the geographical detector method [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1674–1686. [王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因 [J]. *地理学报*, 2018, 73(9): 1674–1686.]
- [24] Shi Wei, Nan Zhuotong, Li Ren, et al. Support vector machine based soil mapping of a typical permafrost area in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(3): 461–469. [石伟, 南卓铜, 李韧, 等. 基于支持向量机的典型冻土区土壤制图研究 [J]. *土壤学报*, 2011, 48(3): 461–469.]
- [25] Zhang Xiumin, Sheng Yu, Zhao Lin, et al. Permafrost distribution using sub-region classification and multivariate data in the wenquan area over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(12): 1513–1520. [张秀敏, 盛煜, 赵林, 等. 基于分区和多元数据的青藏高原温泉区域多年冻土分布研究 [J]. *地理科学*, 2012, 32(12): 1513–1520.]
- [26] Li Zhiying, Guo Yanwei, Geng Xin, et al. Distribution characteristics of groundwater in non-freezing spring area on Tibetan Plateau [J]. *Water Resources Protection*, 2013, 29(3): 10–14. [李颖智, 郭彦威, 耿昕, 等. 青藏高原不冻泉地区地下水分布特征 [J]. *水资源保护*, 2013, 29(3): 10–14.]
- [27] Hu Fansheng, Yang Taibao, Ji Qin, et al. Relationship between the glacier and climate change in the Altun Mountain in recent four decades [J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(3): 581–588. [胡凡盛, 杨太保, 冀琴, 等. 近 40 a 阿尔金山冰川与气候变化关系研究 [J]. *干旱区地理*, 2017, 40(3): 581–588.]
- [28] Liu Guangyue, Wang Wu, Zhao Lin, et al. Using transient electromagnetic method to sound permafrost depth in the West Kunlun Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 38–48. [刘广岳, 王武, 赵林, 等. 基于瞬变电磁法 (TEM) 的西昆仑地区多年冻土厚度探测与研究 [J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 38–48.]
- [29] Qiao Yongping, Zhao Lin, Pang Qiangqiang, et al. Characteristics of permafrost in Gerze County on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(6): 1453–1460. [乔永平, 赵林, 庞强强, 等. 青藏高原改则地区多年冻土特征 [J]. *冰川冻土*, 2015, 37(6): 1453–1460.]
- [30] Wan Z, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(4): 980–996.
- [31] Hao X, Luo S, Che T, et al. Accuracy assessment of four cloud-free snow cover products over the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(4): 375–393.
- [32] Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 213–238.
- [33] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors - based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107–127.
- [34] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250–256.
- [35] Wang J, Hu M, Zhang F, et al. Influential factors detection for surface water quality with geographical detectors in China [J]. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 2018, 32(9): 2633–2645.
- [36] Qin Zhengjie, Hou Shugui, Wang Yetang, et al. Spatio-temporal variability of winter snow cover over the Tibetan-Plateau and its relation to Arctic Oscillation [J]. *Geographical Research*, 2017, 36(4): 743–754. [覃郑婕, 侯书贵, 王叶堂, 等. 青藏高原冬季积雪时空变化特征及其与北极涛动的关系 [J]. *地理研究*, 2017, 36(4): 743–754.]
- [37] Wang Hong, Li Xican, Wan Jianhua, et al. The relationships between MODIS vegetation indices and altitude in the Tibetan plateau [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(11): 39–44. [万红, 李希灿, 万剑华, 等. 青藏高原地区不同植被类型 MODIS 植被指数与海拔高度的关系研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(11): 39–44.]
- [38] Lu Qin, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng. Variations in alpine grassland cover and its correlation with climate variables on the Qinghai-Tibet Plateau in 1982–2013 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(2): 292–300. [陆晴, 吴绍洪, 赵东升. 1982–2013 年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系 [J]. *地理科学*, 2017, 37(2): 292–300.]
- [39] Wang Yinxue, Zhao Lin, Li Ren, et al. A study of factors which control variation of permafrost table [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 1064–1067. [王银雪, 赵林, 李韧, 等. 影响多年冻土上限变化的因素探讨 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 1064–1067.]
- [40] Pang Qiangqiang, Li Shuxun, Zhang Wengang. The influence of underlying surfaces on thermal regime in permafrost regions [J].

Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 32(6): 1003 – 1010. [庞强强, 李述训, 张文刚. 不同下垫面对多年冻土的热状况的影响分析[J]. 冰川冻土, 2009, 32(6): 1003 – 1010.]

[41] Jin Huijun, Sun Liping, Wang Shaoling, et al. Dual influences of local environmental variables on ground temperatures on the interior-eastern Qinghai-Tibet Plateau (I): vegetation and snow cover[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(4): 535 – 545. [金会军, 孙立平, 王绍令, 等. 青藏高原中、东部局地因素对地温的双重影响(I): 植被和雪盖[J]. 冰川冻土, 2008, 30(4): 535 – 545.]

Analyses of the influence factors of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau based on geographical detector

XIAO Yao^{1,2}, ZHAO Lin¹, ZOU Defu¹, LIU Shibo^{1,2}, MA Lu^{1,2}, YING Xue^{1,2}, LIU Yitian^{1,2}
(1. Cryosphere Research Station on the Tibetan Plateau, State Key Laboratory of Cryosphere Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The distribution of permafrost is affected by local geology, landform and surface cover. In order to explore various factors which have different strength of influence on the permafrost distribution, this paper chooses five typical permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau as the research area. This study is based on MODIS and SRTM DEM data extraction research of 2003 to 2012, and then, factors in them like: the average land surface temperature, NDVI, surface albedo, number of snow days, slope and aspect of the research area are studied. The geo-detector model is used to study the degree of influence and the difference of each factor on the distribution of permafrost in the research area. The results show that: (1) In all the study areas, the land surface temperature is the strongest factor affecting the distribution of permafrost, followed by the number of snow days. (2) With the increase of spatial scale range, the influence of slope and aspect on the distribution of permafrost is gradually weakened, while that of surface temperature gradually strengthened. (3) The result of interactive detection shows that the interaction of the two factors has a greater impact on the distribution of permafrost than the single one. This study clarifies the law of regional difference of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau and provides a theoretical basis for mapping permafrost distribution at different scales.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; the distribution of permafrost; Geo-detector; *q* value; influence factor

(本文编辑：周成林)