

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0138

YAO Mingxing, ZHAO Rui, YANG Linchuan, et al. Spatial distribution of permafrost ground temperature by using GWRRK simulation: a case study on the section from Kunlun Mountain to Chiqu Valley around the Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5):1570-1580. [姚明星, 赵锐, 杨林川, 等. 基于GWRRK的多年冻土地温空间分布模拟研究:以青藏铁路昆仑山至尺曲谷地段为例[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5):1570-1580.]

# 基于GWRRK的多年冻土地温空间分布模拟研究 ——以青藏铁路昆仑山至尺曲谷地段为例

姚明星<sup>1</sup>, 赵锐<sup>1</sup>, 杨林川<sup>2</sup>, 齐华<sup>1</sup>, 廖昕<sup>1</sup>, 孟祥连<sup>3</sup>, 周福军<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756; 2. 西南交通大学 建筑学院, 四川 成都 611756;

3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 研究冻土地温空间分布, 有助于探索冻土活动层厚度的变化特征, 为冻土灾害防治提供科学依据。以青藏铁路昆仑山至尺曲谷地段多年冻土覆盖区域为研究区域, 采用地理加权岭回归克里金(GWRRK)方法对该区域2001年7月至9月的地温空间分布进行了模拟, 揭示了该区域多年冻土融化深度的变化特征。结果表明: 研究区域内多年冻土地温总体表现为山区地温低于平原和盆地地区地温; 地温随深度的增加而降低, 在0~5 m的深度区间内温度变化较大, 平均温差为10.3℃, 而在5~15 m的深度区间内基本保持不变, 平均温差仅0.2℃。通过将GWRRK方法与具有外部漂移克里金(KED)方法和地理加权岭回归(GWRR)方法的模拟效果进行对比, 发现前者的模拟精度优于后两种方法。

**关键词:** 地理加权岭回归克里金(GWRRK); 地理加权岭回归; 青藏铁路; 地温分布; 多年冻土

**中图分类号:** P208; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)05-1570-11

## 0 引言

随着全球气候变化加剧, 多年冻土面临退化趋势, 可能对寒区的生态安全产生影响, 诱发诸如崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害问题<sup>[1-3]</sup>。多年冻土对地温变化极其敏感<sup>[4]</sup>, 通过研究其地温空间分布, 可探索冻土活动层厚度的变化规律, 分析冻土热融状况以及未来变化趋势, 为冻土灾害防治提供科学依据。

多年冻土地温既受海拔、纬度和经度的影响, 也受气象、地形地貌、植被、积雪、土壤岩性、含水量等局地因素的影响<sup>[5-10]</sup>。学者基于上述影响因素, 结合冻融指数、热传导、地理加权回归、支持向量机、机器学习等方法开展了多年冻土地温的时空分布模拟研究<sup>[11-16]</sup>。例如, Jafarov等<sup>[11]</sup>、Nicolosky等<sup>[17]</sup>利用GIPL(geophysical institute permafrost laboratory)模型, 考虑气温、降水、土壤热特性和土壤含水量

的影响, 基于含相变的一维非线性热传导方程, 模拟了阿拉斯加州多年冻土的季节冻融深度。Liu等<sup>[18]</sup>利用二维非稳态模型分析了青藏高原多年冻土区路基温度, 模拟了冻土土壤与大气的传热过程。Luo等<sup>[19]</sup>综合考虑了气温、植被、积雪深度和土壤属性等因素, 对黄河源区多年冻土地温的空间分布进行了模拟。Qin等<sup>[20]</sup>、Yin等<sup>[21]</sup>利用GIPL模型分别对青藏高原多年冻土活动层厚度和青藏高原工程走廊年平均温度进行模拟, 前者基于土壤导热系数开展多年冻土活动层厚度模拟, 后者侧重于土壤性质对多年冻土地温的影响。Liu等<sup>[22]</sup>综合考虑气温、风速、风向、地表水分蒸发量、太阳辐射等影响因素, 基于二维非稳态热传导有限元模型, 揭示了冻土路基在给定工况下的地温时空分布特征。Zhao等<sup>[15]</sup>利用地理加权回归模型对青藏铁路沿线多年冻土地温分布进行模拟, 同时指出各因素对地温的影响随时空尺度变化增大, 呈现出典型的空间

收稿日期: 2021-11-22; 修订日期: 2022-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0603101); 国家自然科学基金项目(41571520)资助

作者简介: 姚明星, 助理工程师, 主要从事资源环境空间分析研究. E-mail: swjtuyaomx@my.swjtu.edu.cn

通信作者: 赵锐, 教授, 主要从事应对气候变化、环境生态系统工程研究. E-mail: ruizhao@swjtu.edu.cn

非平稳性特征。此外,各影响因素间可能还存在着交互影响,易引起多重共线性问题<sup>[15]</sup>。

本研究利用地理加权岭回归克里金方法(geographically weighted ridge regression Kriging, GWRRK)构建冻土地温分布模型,以青藏铁路昆仑山至尺曲谷地段多年冻土覆盖区域为例,验证模型的有效性,通过对该区域多年冻土地温分布的揭示,分析冻土融化深度的变化特征。地理加权岭回归克里金方法(GWRRK)既可以充分考虑多年冻土地温与其影响因素间的空间非平稳性,也可消除影响因素之间的多重共线性<sup>[23]</sup>,同时还考虑了拟合残差的影响。昆仑山至尺曲谷地段是青藏铁路建设和运营中冻土变化监测最密集的区域,通过揭示该区域冻土地温空间分布变化趋势,可为铁路安全运营及沿线地质灾害防治提供科学依据。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

研究区位于青藏高原中部,隶属于青海省玉树藏族自治州,北至昆仑山越岭区,南到尺曲谷地,横跨楚玛尔河高平原、可可西里山区、北麓河盆地、风火山山区,该地区是典型的高海拔多年冻土区域。研究区平均海拔 4 900 m,区内山系呈东西走向,山系与河流交替出现,形成高平原、盆地和谷地等地貌。河流主要有楚玛尔河、北麓河和通天河,由冰川融水和大气降水补给,流量季节性变化较大。研究区具有独特的冰缘干旱气候特征,且随海拔增高有明显的气候垂直分带性特征。

### 1.2 数据来源与处理

本文以地温钻孔实测数据为基础,从地理要素、气象条件和局地因素三个维度选取地温影响因素,构建冻土地温分布模型。其中,地理要素主要考虑纬度和高程<sup>[16,24-25]</sup>;气象条件选择近地表气温、风速、降水率、地面向下长波辐射和地面向下短波辐射<sup>[26-29]</sup>;局地因素则考虑地层岩性、坡度、坡向、植被覆盖度<sup>[30-33]</sup>。

青藏高原气温往往在 7 月达到最大,且由于向下传递时存在一定滞后性<sup>[34-35]</sup>,本文重点对研究区 7—9 月的地温空间分布开展模拟,分析其对应的冻土活动层厚度的空间变化特征。本文实测地温数据是来自 2001 年修建青藏铁路工程的钻孔地温数据(采用热敏电阻测温,测温深度为 0.2~15 m,数据采集间隔为 10 天至一年不等)。在研究区域内所获

取的钻孔点位一共 237 个,7 月至 9 月的钻孔地温数据点位分布较为均匀,共 307 次测温数据。其中,7 月测温 96 次,8 月测温 128 次,9 月测温 83 次。通过插值,获取时间序列数据进行对比分析,可更好地了解 7 月至 9 月研究区内整个路段多年冻土地温变化及冻土融化深度变化情况。钻孔位置从北向南穿越不同地形区域,基本反映了青藏高原中低纬度、高海拔的高原冻土特征,样本点具有较好的代表性。研究区及钻孔测温点位分布如图 1 所示,其中左上角小图中的多年冻土分布矢量图来自 Ran 等<sup>[36]</sup>的研究成果。

由于研究区内仅有五道梁一个气象观测站,难以满足模拟的空间分辨率要求。因此,本文气象数据采用青藏高原科学数据中心公开发布的中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018 年),涉及近地面气温、地面降水率、近地面全风速、地面向下短波辐射和地面向下长波辐射共 5 个指标<sup>[37-38]</sup>。上述数据水平空间分辨率为 0.1°。本文利用 ArcGIS 10.2 软件对上述数据进行栅格转点矢量文件处理,并综合对比克里金法、反距离权重法、自然邻域法和趋势面法所获取的 1 km×1 km 分辨率气象数据结果,选用拟合精度最优的克里金插值结果作为气象基础数据。地层岩性数据通过全国 2002 年发布的 1:100 万地质图裁剪获取。地层岩性因素是绘制不同地层岩性区域的实测地温数据与其深度的拟合曲线,计算曲线的拐点坐标,利用拐点的深度坐标值作为地层岩性量化因子。坡向和坡度数据是利用 ArcGIS 10.2 软件对研究区 DEM(分辨率 30 m)计算。植被指数来源于 Terra 卫星 MOD13 Q1 全球 250 m 分辨率植被指数 16 天的合成产品,并利用像元二分模型计算获取植被覆盖度<sup>[39]</sup>。

## 2 模型构建

### 2.1 地理加权岭回归模型

地理加权回归模型(GWR)是在普通线性回归模型的基础上,将空间位置信息嵌入到回归中,以预测每个位置对应因变量的变化,表达式<sup>[40-41]</sup>为

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $(u_i, v_i)$ 为第  $i$  个采样点的坐标(如经纬度); $p$ 为影响因素的个数,本文共考虑了 11 个影响因子,故  $p = 11$ ;  $\beta_k(u_i, v_i)$ 为第  $i$  个采样点上的第  $k$  个回归参数,是关于地理位置的函数,  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ ,

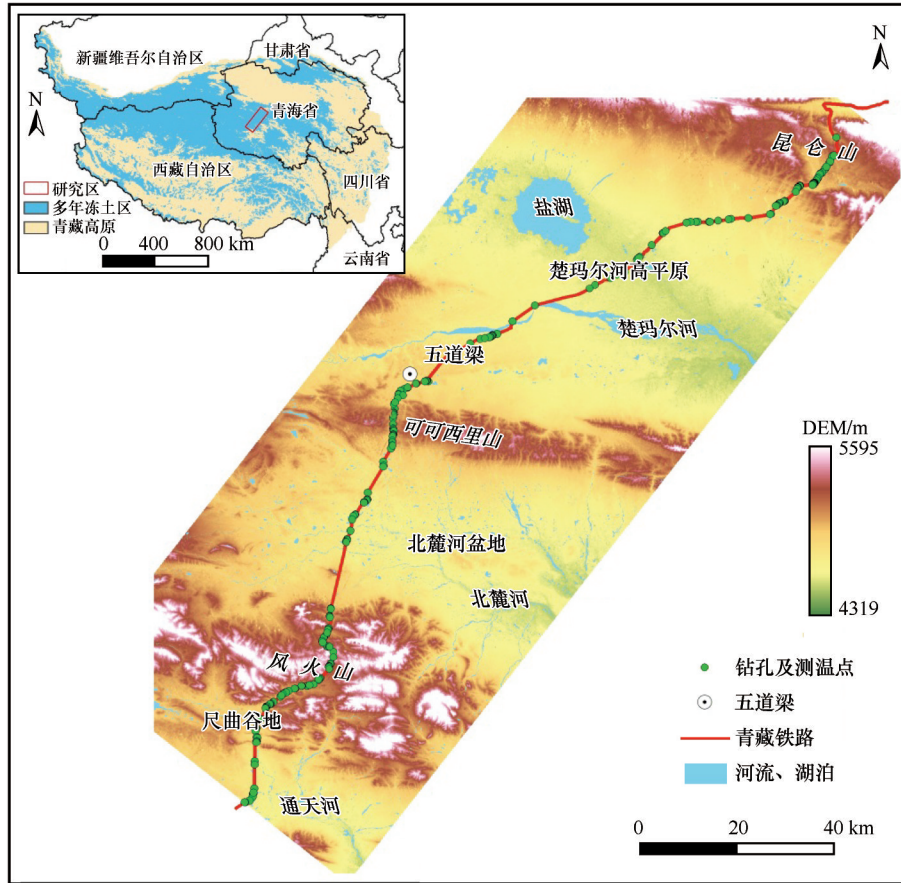


图1 研究区及钻孔点位分布

Fig. 1 Study area and distribution of the boreholes

$$\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0 (i \neq j).$$

为解决地理加权回归中可能存在的因子间多重共线性问题, Wheeler<sup>[42]</sup>将地理加权回归(GWR)与岭回归结合, 提出了地理加权岭回归模型(GWRR), 其回归参数 $\hat{\beta}_i$ 可估计为

$$\hat{\beta}_i = (X^T W_i X + \lambda I)^{-1} X^T W_i y \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为岭回归参数。本文的岭回归参数 $\lambda$ 通过设置方差膨胀系数阈值小于5(VIF<5)确定得到。

在地理加权岭回归模型中, 第 $i$ 个点上的因变量拟合值 $\hat{y}_i$ <sup>[42]</sup>为

$$\hat{y}_i = X_i \hat{\beta}_i = X_i (X^T W_i X + \lambda I)^{-1} X^T W_i y \quad (3)$$

## 2.2 地理加权岭回归克里金模型

地理加权岭回归克里金模型(GWRRK)是将GWRR与普通克里金插值方法(ordinary Kriging, OK)结合, 即在GWRR拟合后, 利用OK处理回归中的残差问题, 以此来提高GWRR的预测精度, 表达式<sup>[23]</sup>为

$$y_{\text{GWRRK}}^*(i) = y_{\text{GWRR}}^*(i) + \varepsilon_{\text{OK}}^*(i) \quad (4)$$

式中: $y_{\text{GWRRK}}^*(i)$ 为位置 $i$ 在GWRRK中的模拟值;

$y_{\text{GWRR}}^*(i)$ 为位置 $i$ 在GWRR中的模拟值; $\varepsilon_{\text{OK}}^*(i)$ 为位置 $i$ 在局部回归残差项的OK插值。

第 $i$ 处地理加权岭回归模型(GWRR)的模拟值 $y_{\text{GWRR}}^*(i)$ 表述<sup>[23]</sup>为

$$y_{\text{GWRR}}^*(i) = X_i \hat{\beta}_i = X_i (X^T W_i X + \lambda I)^{-1} X^T W_i y \quad (5)$$

样本点数值 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 与插值点的空间区域变化函数为 $Z(x_i)$ , 则GWRR第 $i$ 处局部回归残差项的克里金插值模拟值 $\varepsilon_{\text{OK}}^*(i)$ 可表达<sup>[23]</sup>为

$$\varepsilon_{\text{OK}}^*(i) = \sum_{j=1}^n \lambda_j Z(x_j) \quad (6)$$

上式必须满足以下条件,

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 & (i = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i, x_j) - \mu = \bar{C}(x_i, V) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $C(x_i, x_j)$ 为采样点 $x_i$ 与 $x_j$ 之间的变异函数值; $\mu$ 为拉格朗日常数。

## 2.3 具有外部漂移的克里金模型

具有外部漂移的克里金模型(Kriging with an external drift, KED)是带有趋势克里金模型的拓



展,既考虑了样本点与待估计点之间的空间分布几何特征,又考虑了样本间空间关系的结构特征<sup>[43]</sup>。

设  $u$  处属性值  $Z(u)$  由漂移函数  $m(u)$  和残差  $R(u)$  组成<sup>[43]</sup>,即

$$Z(u) = m(u) + R(u) \quad (8)$$

漂移函数通常可表示为

$$m(u) = \beta_0 + \sum_{l=1}^n \beta_l x_l(u) \quad (l = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中:  $\beta_0, \beta_l$  为未知系数;  $x_l(u)$  为漂移函数的辅助变量。

样本点数值  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$  与插值点的空间区域变化函数为  $Z(x_i)$ , 则残差  $R(u)$  可表达<sup>[23]</sup>为

$$R(u) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (10)$$

上式必须满足式(7)。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 模型精度验证

本文采用留一交叉验证方法 (leave-one-out cross-validation, LOO-CV) 对模型结果进行验证,其基本思想是每次从个数为  $N$  的样本集中抽取出一个

样本作为验证集,剩下的  $N-1$  个样本作为训练集,重复进行  $N$  次,依次取遍所有  $N$  个数据作为验证集,最后将平均  $N$  个数据的结果作为泛化误差的估计<sup>[44]</sup>。该方法较其他验证方法具有训练样本量大、接近原始样本分布的特点<sup>[45]</sup>。

图2是研究区2001年7月至9月钻孔点位在0.2~15 m深度上的留一交叉验证结果。可以看出,模型具有较高的拟合优度,平均拟合优度达0.89。其中,7月的拟合优度最大,  $R^2=0.91$ , 且平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 和均方根误差 (root mean square error, RMSE) 相对较小; 8月的拟合优度最小,  $R^2=0.87$ ; 9月拟合结果的均方根误差 (RMSE) 值最小, 达0.694。7月至9月精度验证结果的平均绝对误差整体偏小, 最大误差为0.613 °C, 说明本文所建 GWRRK 模型具有一定的稳健性, 可用于案例研究区域的多年冻土地温分布模拟分析。此外发现, 模拟地温与实测地温在-4~2.5 °C 的温度区间范围内重合度较高, 说明在该温度区间内模拟的误差相对较小, 而在大于2.5 °C 的温度区间内偏差较大, 可能由于不同地形区域内地温波动较大所致。

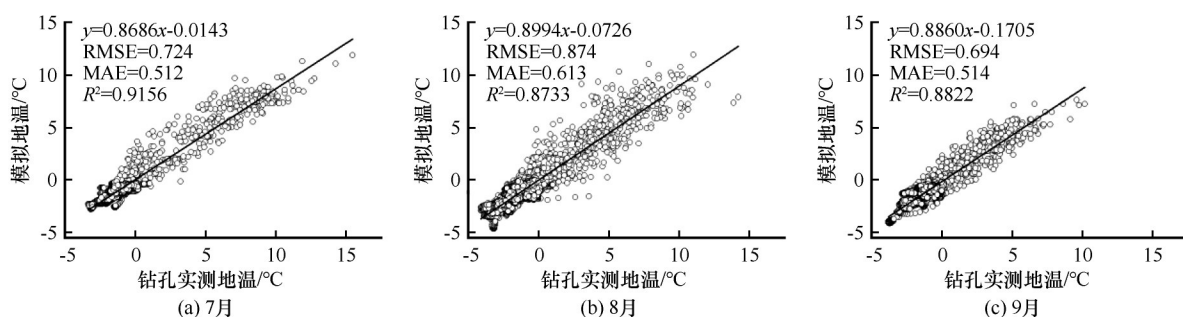


图2 GWRRK 模型留一交叉验证结果

Fig. 2 Scatter distribution of LOO-CV results regarding the GWRRK model: in July (a), August (b) and September (c)

为进一步验证模拟结果的有效性,本文分别从不同地形区域中随机选取1个钻孔测温点,点位分布如图3所示,将其对应的模拟结果与实测结果对比。由图4可知,在不同区域的地温模拟值与实测值的拟合精度  $R^2$  都大于0.95;均方根误差 (RMSE) 最小达0.149。此外,除图4(a)昆仑山区域7月的模拟值与实测值有一定偏差外,其他位置不同时间段的模拟结果与实测结果的变化趋势几乎一致。这也说明 GWRRK 在该研究区域尺度内的模拟精度较高,后续可用于地温场的分布预测。

#### 3.2 研究区冻土地温分布特征

从图4中可以发现,研究区不同地形区域多年

冻土地温在5~15 m 的深度范围内,地温分布变化不明显,地温曲线呈垂直形态。因此,本文绘制了研究区域在2001年7月至9月间多年冻土地下0.2~5.0 m 的地温分布情况,如图5所示。研究区内山区地温显著低于平原和盆地地温,风火山、可可西里山和昆仑山越岭区的地温相对较低;而尺曲谷地、北麓河盆地以及楚玛尔河高平原地区的地温相对较高。通过对比图5中7月至9月的地温分布情况,发现最北端的昆仑山越岭区在0.2~5.0 m 的深度区间内,地温随时间推移,降低得最快;而最南端尺曲谷地的地温则降低得最慢。楚玛尔河高平原区域海拔变化不大,地温变化并不明显,可能是由于该区域



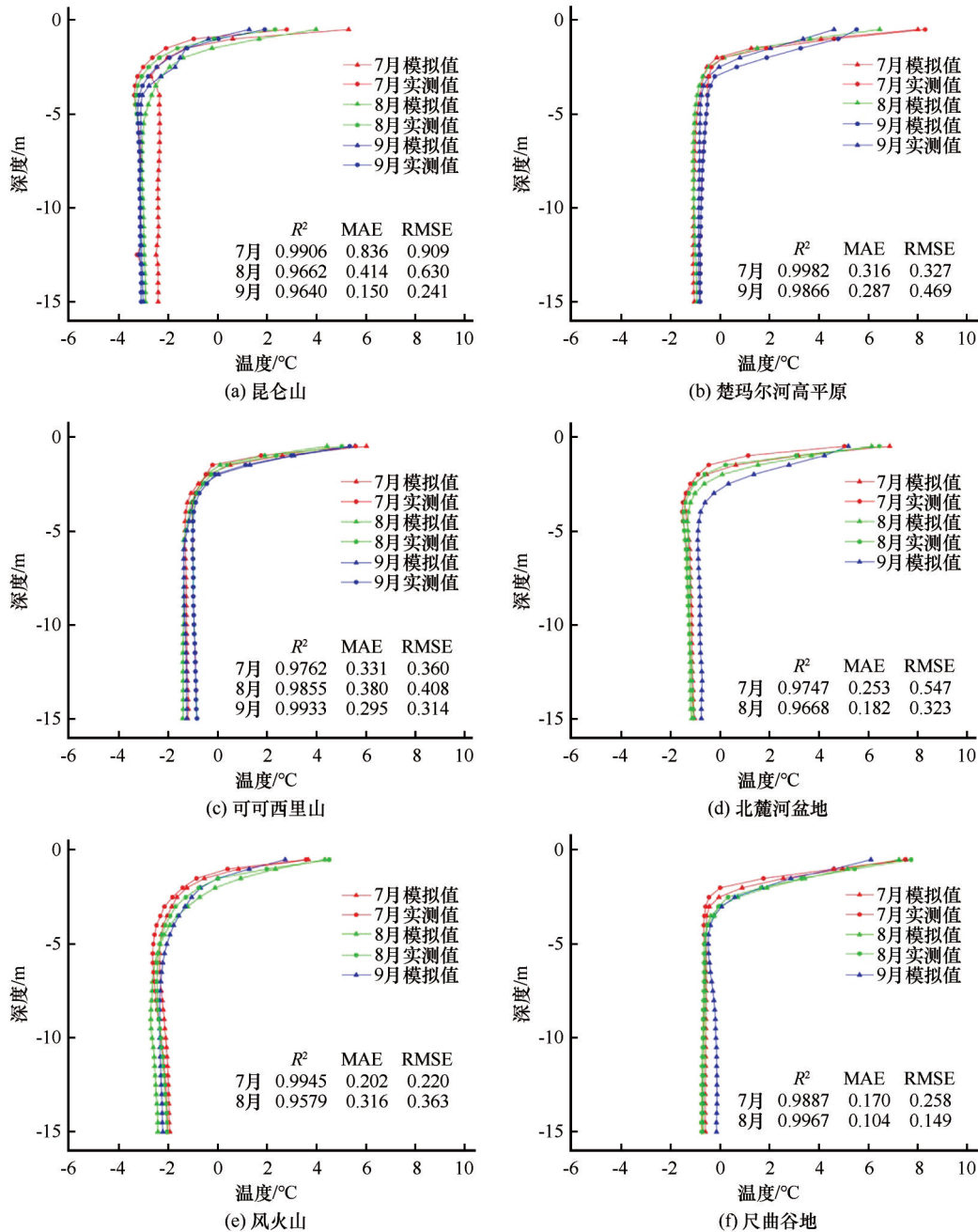


图4 研究区域内不同地形位置钻孔点地温模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison between simulation results and borehole ground temperatures in different terrain areas: Kunlun Mountain (a), Chumar River High Plain (b), Hoh Xil Mountain (c), Beilu River Basin (d), Fenghuo Mountain (e) and Chiqu Valley (f)

面向下长波辐射、地面向下短波辐射、纬度和气温。

就同一因素,在不同月份对多年冻土地温的影响程度也存在显著差异。如地面向下长波辐射在7月对地温的影响呈正相关,而在8月的影响呈负相关;9月在0.5~3.0 m的深度区间呈正相关,而在3.5~5.0 m的深度区间呈负相关。气温在7月和9月呈现负相关,而在8月呈现正相关,其可能原因在于7月气温在研究区域达到最大,而地温向下传递

的过程仍存在一定的滞后性,故呈现负相关;8月地温在持续升温中,大气温度还未开始明显下降,故地温与气温呈现明显正相关;到9月,大气温度开始下降,地温仍处于持续升温过程,故9月地温与气温再次呈现负相关。

此外,本文更多的是从数据驱动建模的角度对研究区地温分布模拟开展研究,在模型的应用、影响因素的选取和实验中存在着一定的不确定性。



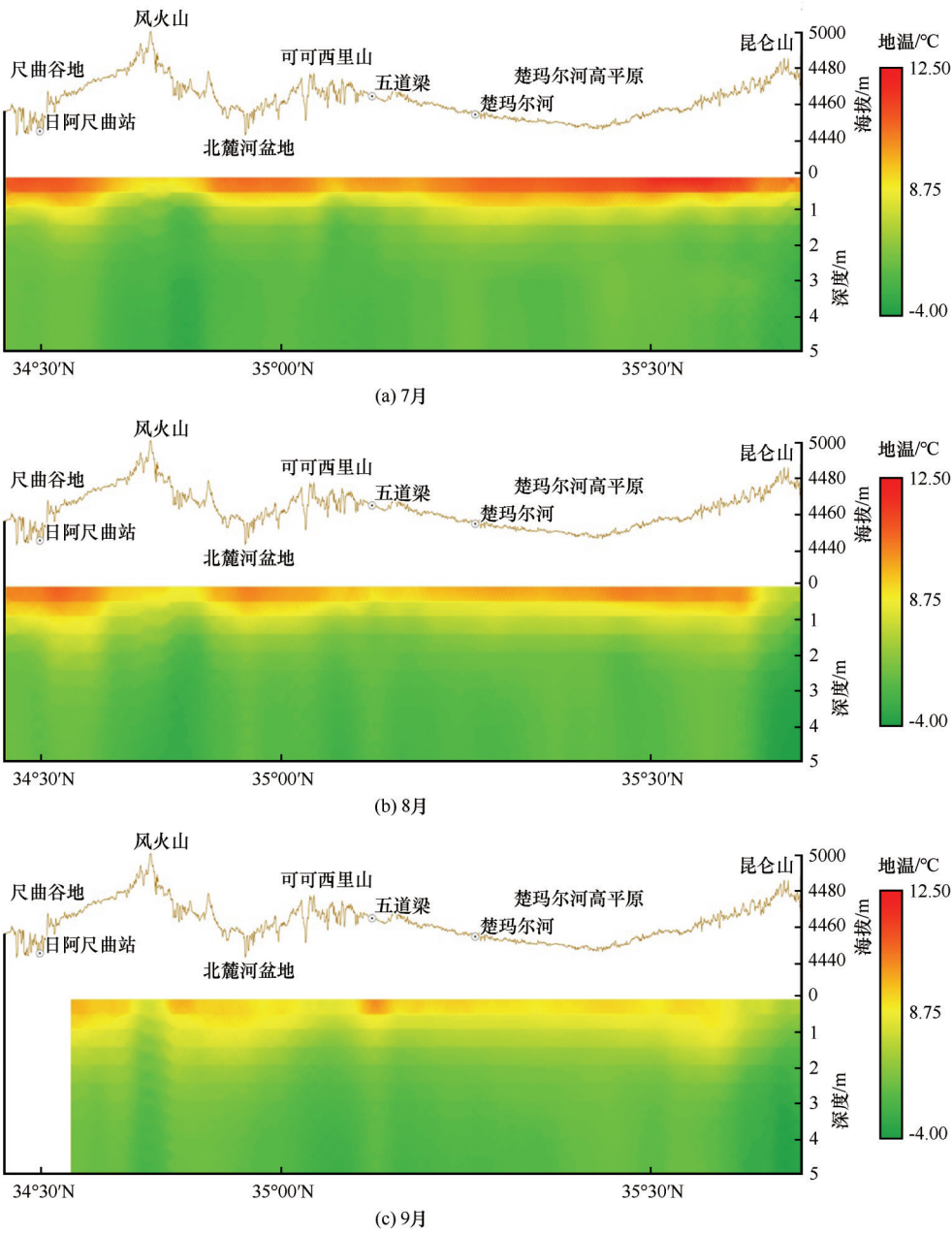


图5 研究区域2001年7月(a)、8月(b)和9月(c)的地温空间分布  
Fig. 5 Distribution of ground temperature in the study area in July (a), August (b) and September (c), 2001

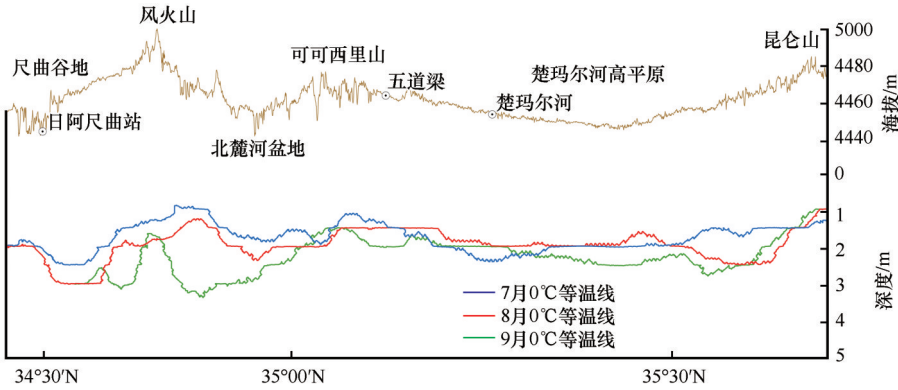


图6 研究区域2001年7月至9月的0℃等温线  
Fig. 6 The 0℃ isotherm in the study area in July (blue), August (red) and September (green), 2001

表1 研究区域内不同地形地区多年冻土融化深度变化(单位:m)

月份	昆仑山	楚玛尔河高平原	可可西里山	北麓河盆地	风火山	尺曲谷地
7月	1.47	2.00	1.70	1.56	1.20	2.08
8月	1.52	2.03	1.77	1.89	1.73	2.46
9月	1.35	2.37	1.92	3.08	2.39	3.07

表2 不同模型的精度对比

模型	$R^2$	MAE	RMSE
KED	0.8605	0.623	0.924
GWRR	0.8645	0.633	0.904
GWRRK	0.8733	0.613	0.874

首先,文中通过岭回归模型消除影响因素间的多重共线性,方差膨胀系数VIF值小于10即可认为变量间不存在多重共线性。本文选取所有变量VIF<sub>max</sub>值小于5来确定模型岭回归参数λ,可以明确模型消除了多重共线性问题,但却无法量化岭回归参数λ对

模拟结果的影响。其次,由于地理位置的特殊性,本文的气象数据采用青藏高原科学数据中心公开发布的中国区域地面气象要素驱动数据集插值而得到,但未对插值后的数据进行评价,可能导致其对模拟结果产生偏差。此外,在结果阐释方面,研究区内高温多年冻土和低温多年冻土可能同时存在,与自然状况下的多年冻土地温曲线有所不同,可能与铁路修建引起的热扰动相关,但其影响的深层原因、作用机制等还有待进一步探究分析。后续研究考虑进一步优化和改进模型,将数据驱动模型和多年冻土形成的机理知识结合,将不同区域的模

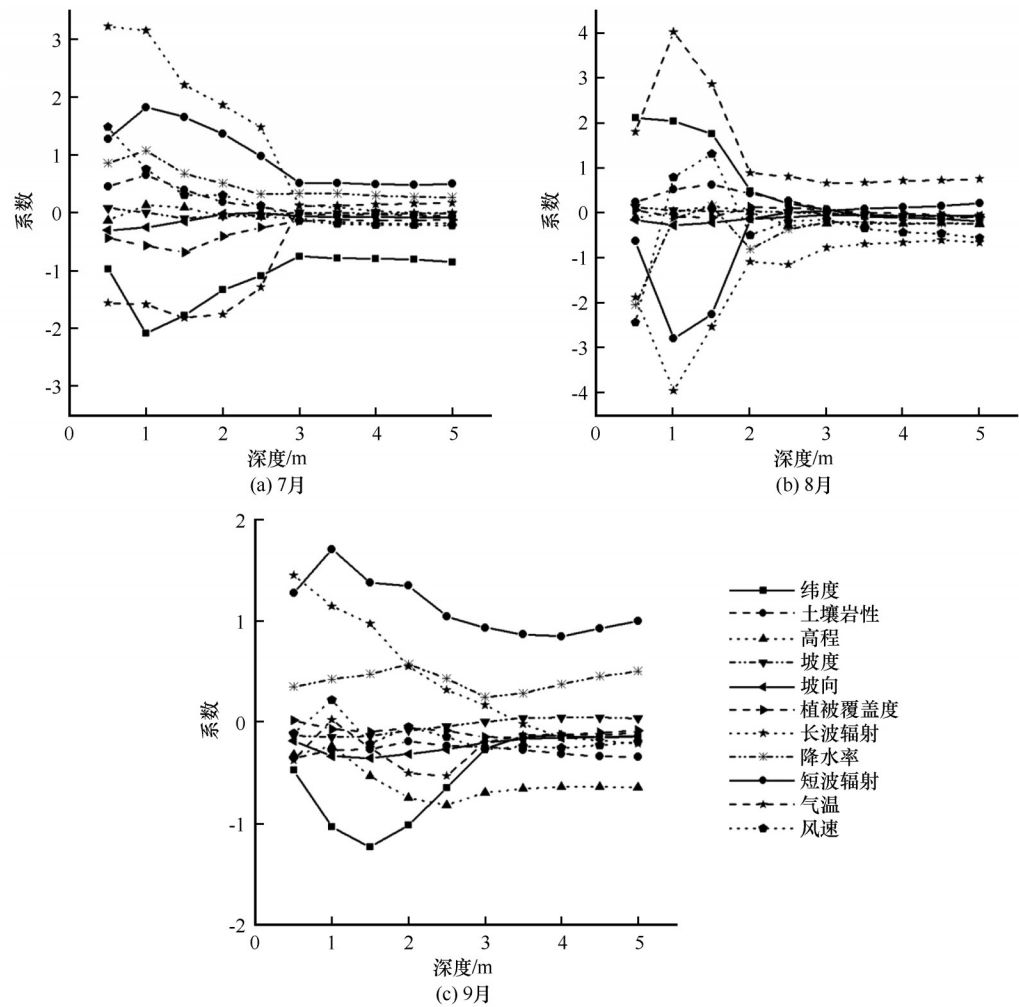


图7 GWRRK模型回归系数平均值变化

Fig. 7 Change of mean value of regression coefficient of GWRRK model: in July (a), August (b) and September (c)



拟结果整体对比,以验证模拟结果的区域差异;同时从不同地形环境、不同时段和不同层次的角度,对研究区多年冻土地温的影响机理进行深入分析,聚焦地温的水平与垂直分布特征分析,以揭示不同因子对地温空间及深度分布的贡献率。

#### 4 结论

本文以青藏铁路昆仑山至尺曲谷地段为例,利用 GWRRK 方法对铁路沿线多年冻土地温的空间分布进行了模拟,分析了 2001 年 7 月至 9 月研究区域内多年冻土地温的分布变化特征,获取了该地区多年冻土的融化深度。

结果表明,研究区域内多年冻土地温总体呈现山区地温低于平原和盆地地温的特征;地温随冻土深度增加而降低,地温在深度 0~5 m 的区间内温度变化较大,平均温差为 10.3 °C,而在 5~15 m 的深度区间基本保持不变,平均温差为 0.2 °C。研究区域最北端的昆仑山越岭区地温下降最快,最南端尺曲谷地的地温下降最慢;楚玛尔河高原区域受河流湖泊的影响,地温和冻土活动层厚度的变化不明显,而风火山南北坡向地区的冻土融化深度变化最显著。本文将 GWRRK 方法的模拟效果与具有外部漂移克里金方法(KED)和地理加权岭回归(GWRR)进行了对比,反映出 GWRRK 方法具有较高的精度优势,可通过该方法弥补地面监测的信息缺口。

#### 参考文献(References):

- [1] Yao Tandong, Thompson L G, Mosbrugger V, et al. Third pole environment (TPE) [J]. *Environmental Development*, 2012, 3: 52-64.
- [2] Farquharson L M, Romanovsky V E, Cable W L, et al. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian High Arctic [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(12): 6681-6689.
- [3] Luo Dongliang, Jin Huijun, Lin Lin, et al. Degradation of permafrost and cold-environments on the interior and eastern Qinghai Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 538-546. [罗栋梁, 金会军, 林琳, 等. 青海高原中、东部多年冻土及寒区环境退化[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(3): 538-546.]
- [4] Yang Jianping, Yang Suiqiao, Li Man, et al. Vulnerability of frozen ground to climate change in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1436-1445. [杨建平, 杨岁桥, 李曼, 等. 中国冻土对气候变化的脆弱性[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1436-1445.]
- [5] Luo Dongliang, Jin Huijun, Jin Xiaoying, et al. Elevation-dependent thermal regime and dynamics of frozen ground in the Bayan Har Mountains, northeastern Qinghai-Tibet Plateau, Southwest China [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2018, 29(4): 257-270.
- [6] Luo Dongliang, Jin Huijun, Bense V F. Ground surface temperature and the detection of permafrost in the rugged topography on NE Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geoderma*, 2019, 333: 57-68.
- [7] Ji Fang, Fan Linfeng, Andrews C B, et al. Dynamics of seasonally frozen ground in the Yarlung Zangbo River basin on the Qinghai-Tibet Plateau: historical trend and future projection [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 104081.
- [8] Li Jing, Sheng Yu, Wu Jichun, et al. Landform-related permafrost characteristics in the source area of the Yellow River, eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geomorphology*, 2016, 269: 104-111.
- [9] Wei Zhi, Jin Huijun, Zhang Jianming, et al. Prediction of permafrost changes in Northeastern China under a changing climate [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 54(6): 924-935.
- [10] Pang Qiangqiang, Zhao Lin, Li Shuxun. Influences of local factors on ground temperatures in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Highway [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 349-356. [庞强强, 赵林, 李述训. 局地因素对青藏公路沿线多年冻土地温影响分析[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 349-356.]
- [11] Jafarov E E, Marchenko S S, Romanovsky V E. Numerical modeling of permafrost dynamics in Alaska using a high spatial resolution dataset [J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(3): 613-624.
- [12] Ferreira A, Vieira G, Ramos M, et al. Ground temperature and permafrost distribution in Hurd Peninsula (Livingston Island, Maritime Antarctic): an assessment using freezing indexes and TTOP modelling [J]. *Catena*, 2017, 149: 560-571.
- [13] Wang Taihua, Yang Dawen, Fang Beijing, et al. Data-driven mapping of the spatial distribution and potential changes of frozen ground over the Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 515-525.
- [14] Liu Hongchao, Ma Junjie, Li Ren. Simulation of the water-thermal features within the surface soil in Tanggula region, Qinghai-Tibet Plateau, by using KNN model [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 1243-1252. [刘宏超, 马俊杰, 李韧. 基于 KNN 机器学习方法对青藏高原唐古拉地区表层土壤水热状况的模拟[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 1243-1252.]
- [15] Zhao Rui, Yao Mingxing, Yang Linchuan, et al. Using geographically weighted regression to predict the spatial distribution of frozen ground temperature: a case in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(2): 024003.
- [16] Ran Youhua, Li Xin, Cheng Guodong, et al. Mapping the permafrost stability on the Tibetan Plateau for 2005—2015 [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2021, 64(1): 62-79.
- [17] Nicolsky D J, Romanovsky V E, Panda S K, et al. Applicability of the ecosystem type approach to model permafrost dynamics across the Alaska North Slope [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017, 122(1): 50-75.
- [18] Liu Zhiyun, Chen Jianbing, Jin Long, et al. Roadbed temperature study based on earth-atmosphere coupled system in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 86: 167-176.
- [19] Luo Dongliang, Jin Huijun, Marchenko S, et al. Distribution and changes of active layer thickness (ALT) and soil temperature (TTOP) in the source area of the Yellow River using the GIP model [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(8): 1834-1845.

- [20] Qin Yanhui, Wu Tonghua, Zhao Lin, et al. Numerical modeling of the active layer thickness and permafrost thermal state across Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(21): 11604-11620.
- [21] Yin Guoan, Zheng Hao, Niu Fujun, et al. Numerical mapping and modeling permafrost thermal dynamics across the Qinghai-Tibet engineering corridor, China integrated with remote sensing[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 2069.
- [22] Liu Zhiyun, Cui Fuqing, Chen Jianbing, et al. Study on the permafrost heat transfer mechanism and reasonable interval of separate embankment for the Qinghai-Tibet expressway [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 170: 102952.
- [23] Chen Shilei, Xiong Lihua, Ma Qiumei, et al. Improving daily spatial precipitation estimates by merging gauge observation with multiple satellite-based precipitation products based on the geographically weighted ridge regression method [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125156.
- [24] Yang Meixue, Nelson F E, Shiklomanov N I, et al. Permafrost degradation and its environmental effects on the Tibetan Plateau: a review of recent research[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 103(1/2): 31-44.
- [25] Li Jing, Sheng Yu, Wu Jichun, et al. Application of the equivalent-elevation approach to alpine permafrost distribution models in the upper reaches of the Shule River, Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 357-363. [李静, 盛煜, 吴吉春, 等. 等效高程方法在祁连山区高山/高海拔多年冻土分布模型中的应用[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 357-363.]
- [26] Fang Xiaoyu, Li Zhongqin, Wuennemann B, et al. Physical energy-balance and statistical glacier melting models comparison and testing for Shiyi Glacier, Heihe River Basin, Qilian Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2): 336-350. [方潇雨, 李忠勤, Wuennemann B, 等. 冰川物质平衡模式及其对比研究: 以祁连山黑河流域十一冰川研究为例[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(2): 336-350.]
- [27] Li Zhenchao, Wei Zhigang, Lv Shihua, et al. Effect of land surface processes on the Tibetan Plateau's past and its predicted response to global warming: an analytical investigation based on simulation results from the CMIP5 model[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(4): 1155-1166.
- [28] Zhang Mingli, Wen Zhi, Xue Ke, et al. A coupled model for liquid water, water vapor and heat transport of saturated-unsaturated soil in cold regions: model formulation and verification [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(8): 701.
- [29] Zhou Jian, Kinzelbach W, Cheng Guodong, et al. Monitoring and modeling the influence of snow pack and organic soil on a permafrost active layer, Qinghai-Tibetan Plateau of China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 90: 38-52.
- [30] Jin Huijun, Wei Zhi, Wang Shaoling, et al. Assessment of frozen-ground conditions for engineering geology along the Qinghai-Tibet highway and railway, China[J]. *Engineering Geology*, 2008, 101(3/4): 96-109.
- [31] Jin Huijun, Hao Jiaqian, Chang Xiaoli, et al. Zonation and assessment of frozen-ground conditions for engineering geology along the China-Russia crude oil pipeline route from Mohe to Daqing, Northeastern China [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(3): 213-225.
- [32] 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.]
- [33] You Mingdong, Li Haibo, Ge Min, et al. The influence factors of permafrost active layer depth and their annual change in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(3): 480-491. [尤明东, 李海波, 葛敏, 等. 黑龙江省冻土活动层厚度年际变化影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(3): 480-491.]
- [34] Zhang Mingli, Wen Zhi, Li Desheng, et al. Impact process and mechanism of summertime rainfall on thermal-moisture regime of active layer in permafrost regions of central Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148970.
- [35] Wang Genxu, Mao Tianxu, Chang Juan, et al. Impacts of surface soil organic content on the soil thermal dynamics of alpine meadows in permafrost regions: data from field observations [J]. *Geoderma*, 2014, 232: 414-425.
- [36] Ran Youhua, Li Xin. The mean annual ground temperature (MAGT) and permafrost thermal stability dataset over Tibetan Plateau for 2005—2015 [DB]. Beijing: National Tibetan Plateau Data Center, 2019.
- [37] Yang Kun, He Jie, Tang Wenjun, et al. On downward short-wave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1): 38-46.
- [38] He Jie, Yang Kun, Tang Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 25.
- [39] Li Miaomiao, Wu Bingfang, Yan Changzhen, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing[J]. *Resources Science*, 2004, 26(4): 153-159. [李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. *资源科学*, 2004, 26(4): 153-159.]
- [40] Zhou Qianling, Wang Changxin, Fang Shijiao. Application of geographically weighted regression (GWR) in the analysis of the cause of haze pollution in China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10(3): 835-846.
- [41] Qu Mingkai, Li Weidong, Zhang Chuanrong, et al. Geographically weighted regression and its application prospect in soil and environmental sciences[J]. *Soils*, 2014, 46(1): 15-22. [瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 地理加权回归及其在土壤和环境科学上的应用前景[J]. *土壤*, 2014, 46(1): 15-22.]
- [42] Wheeler D C. Diagnostic tools and a remedial method for collinearity in geographically weighted regression [J]. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2007, 39(10): 2464-2481.
- [43] Huang Xiaoyu, Chen Yuan, Xiong Yi, et al. Merging radar and rain gauge data using Kriging with external drift (KED) for quantitative precipitation estimation[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(2): 288-297. [黄小玉, 陈媛, 熊毅, 等. 漂移克里金方法在雷达和雨量计联合估测降水中的应用[J]. *气象学报*, 2009, 67(2): 288-297.]
- [44] Devroye L, Wagner T. Distribution-free performance bounds for potential function rules[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1979, 25(5): 601-604.
- [45] Luo Shezhou, Wang Cheng, Zhang Guibin, et al. Forest leaf area index (LAI) inversion using airborne LiDAR data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5): 1467-1475. [骆社周, 王成, 张贵宾, 等. 机载激光雷达森林叶面积指数反演研究[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1467-1475.]
- [46] Yuan Liming, Zhao Lin, Li Ren, et al. Spatiotemporal characteristics of hydrothermal processes of the active layer on the cen-

- tral and northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136392.
- [47] Sun Zhe, Zhao Lin, Hu Guojie, et al. Modeling permafrost changes on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1966 to 2100: a case study from two boreholes along the Qinghai-Tibet engineering corridor[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, 31(1): 156-171.
- [48] Hinzman L D, Goering D J, Kane D L. A distributed thermal model for calculating soil temperature profiles and depth of thaw in permafrost regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D22): 28975-28991.
- [49] Guo Donglin, Li Duo, Liu Guangyue. Simulated change in soil temperature on the Tibetan Plateau from 1901 to 2010[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(5): 1102-1110. [郭东林, 李多, 刘广岳. 1901—2010年青藏高原土壤温度变化的模拟研究[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(5): 1102-1110.]

## Spatial distribution of permafrost ground temperature by using GWRRK simulation: a case study on the section from Kunlun Mountain to Chiqu Valley around the Qinghai-Tibet Railway

YAO Mingxing<sup>1</sup>, ZHAO Rui<sup>1</sup>, YANG Linchuan<sup>2</sup>, QI Hua<sup>1</sup>, LIAO Xin<sup>1</sup>,  
MENG Xianglian<sup>3</sup>, ZHOU Fujun<sup>3</sup>

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. School of Architecture, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 3. China Railway

First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The spatial distribution of permafrost ground temperature is significant to identify the changes in the active layer thickness, which can provide insight into the prevention of the geohazard. This paper takes the permafrost coverage area from Kunlun Mountain to Chiqu Valley around the Qinghai-Tibet Railway as the study area, and uses the geographically weighted ridge regression Kriging (GWRRK) method to simulate the spatial distribution of its ground temperature from July to September in 2001, in order to reveal the variation of its associated thawing depth. The results show that the permafrost ground temperature in mountainous areas is generally lower than that in the plains and basins, and it decreases with the increase of ground depth. The temperature varies greatly in the ground depth interval of 0~5 m, and the average temperature difference is 10.3 °C. However, in the ground depth interval of 5~15 m, the temperature remains nearly unchanged, and the average difference is only 0.2 °C. By comparing the performance of the GWRRK method with Kriging with an external drift (KED) method and geographically weighted ridge regression (GWRR) method, it is identified that the simulation accuracy of the former is better than the latter two methods.

**Key words:** geographically weighted ridge regression Kriging (GWRRK); geographically weighted ridge regression; Qinghai-Tibet Railway; distribution of ground temperature; permafrost

(责任编辑: 赵林)