

基于MODIS的秦巴山地气温估算与山体效应分析

刘俊杰^{1,2}, 潘自武^{1,2}, 秦 奋^{1,2,3}, 顾江岩¹, 朱明阳¹, 赵 芳¹

(1. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004; 2. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004; 3. 河南省时空大数据产业技术研究院, 郑州 450000)

摘要: 秦巴山地作为横亘在中国南北过渡带的巨大山脉, 其山体效应对中国中部植被和气候的非地带性分布产生了重要的影响, 山体内外同海拔的温差是表征山体效应大小较为理想的指标。本研究结合MODIS地表温度(LST)数据、STRM-1 DEM数据和秦巴山地的118个气象站点的观测数据, 分别采用普通线性回归(OLS)和地理加权回归(GWR)两种分析方法对秦巴山地的气温进行估算, 在此基础上将秦巴山地各月气温转换为同海拔(1500 m, 秦巴山地平均海拔)气温, 对比分析秦巴山地的山体效应。结果表明: ① 相比OLS分析, GWR分析方法的精度更高, 各月回归模型的 R^2 均在0.89以上, 均方根误差(RMSE)在0.68~0.98 °C之间。② 利用GWR估算得到的同海拔气温, 从东向西随海拔升高呈现了明显的升高的趋势, 秦岭西部山地比东段升高约6 °C和4.5 °C; 大巴山西部山地年均和7月份同海拔的气温较东段升高约8 °C和5 °C。③ 从南向北, 以汉江为分界, 秦岭与大巴山的同海拔的气温均呈现出由山体边缘向内部升高的趋势。④ 秦巴山地西部大起伏高山, 秦岭大起伏高中山和大巴山大起伏中山, 相比豫西汉中中山谷地, 各月均同海拔气温分别升高了约3.85~9.28 °C、1.49~3.34 °C和0.43~3.05 °C, 平均温差约为3.50 °C, 说明秦巴山地大起伏中高山的山体效应十分明显。

关键词: 山体效应; 秦巴山地; MODIS地表温度; 气温估算; 地理回归加权

DOI: 10.11821/dlyj020190164

1 引言

山地作为陆地生态系统的重要组成部分, 具有高度异质的生境和浓缩的环境梯度, 塑造了地表生态地理格局的复杂性和多样性。山体/高原隆起产生的山体效应通过改变区域的水热状况, 导致植被和气候呈现非地带性, 比如巨大山体同类型植被分布界限高于外围孤立山体^[1,2], 改变了山地垂直带的地带性规律, 影响到关键气候带的分布界限^[3-5]。

秦巴山地位于中国的北亚热带和暖温带的过渡带, 即南北过渡带, 受地理位置, 地形起伏和人类活动等诸多因素的影响, 植被、土壤和气候呈现了明显的非地带性分异。早期的学者对秦巴山地不同地段的土壤和植物区系进行调查, 发现它们随地理位置、山体高度和坡向的不同而呈现规律变化^[6-9]; 对秦岭主峰太白山温度的研究, 表明气温递减率在不同坡向存在明显差异^[10,11]。而今在全球气候变化背景下, 人们发现秦巴山地植被对气候变化的响应也呈现非地带性, 主要表现在不同海拔、不同坡向存在不同变化。比如秦岭北部温度变化比秦岭南部明显^[12], 秦岭北坡植被(巴山冷杉)分布范围向高海拔地

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601091); 中国南北过渡带综合科学考察项目(2017FY100900); 国家科技平台建设项目(2005DKA32300)

作者简介: 刘俊杰(1995-), 女, 河南周口人, 硕士, 主要从事山地GIS、山地地理研究。E-mail: junjieliu555@163.com

通讯作者: 赵芳(1984-), 女, 河南三门峡人, 讲师, 主要从事山地地理、山地生态环境研究。

E-mail: zhaofang84@163.com

区发生迁移的程度也更为明显^[13]。过去的解释主要集中于大尺度的季风气候,秦巴山体的屏障作用、和坡向效应的影响且偏重定性描述^[14-16],缺乏科学的定量解释。其主要的原因是对秦巴山地的山体效应认识不足,而山体效应是自然地理学中非地带性研究的重要突破口^[4]。

山体效应最早发现于阿尔卑斯山,原指林线、雪线等与温度相关的界限在阿尔卑斯山中央比外围分布要高的趋势^[17, 18],后来在热带山区^[18]、比利牛斯山^[19]、安第斯山中部^[20]、青藏高原地区^[21]都发现大型山系内部同类植被分布界限高于外围孤立山体。近年来,张朔基于山体基面高度对山体效应进行了间接量化^[22],韩芳等,赵芳等以此研究了山体效应对不同尺度林线和雪线高度分布的影响^[23-25]。秦巴山地不同地段山体特征差异明显,如秦岭南坡缓长,北坡陡峭,西秦岭海拔较高而东部海拔较低,导致不同地段山体效应存在差异。对秦巴山地山体效应进行定量估算,关系到秦巴山地垂直带界限的确定、垂直带分异因素尤其是非地带性因素的作用强度的分析,甚至影响中国暖温带和北亚热带界限的确定。

山体效应产生的实质是山体的增温效应,巨大的山体或高原比同海拔自由大气吸收更多的太阳辐射,再以长波辐射的形式对外放出热量,从而对山体本身和周围产生增温,使得山体内部温度高于外围同海拔自由大气^[4, 26, 27]。因此,山体内外同海拔气温差是表征山体效应大小较为理想的指标,获得秦巴山地的气温分布数据,并估算山体内外同海拔气温差成为山体效应量化的关键^[4]。但是山区气象观测站点稀疏且大多位于山谷和低海拔地区,导致秦巴山地山体效应的量化存在困难^[28]。随着红外遥感技术的发展,利用航空传感器或人造卫星获得地表温度成为气温估算的有效方法,其中MODIS传感器提供的地表温度(LST)数据已被广泛用于台站观测稀疏的山区的气温估算^[29, 30]。地理加权回归(GWR)在不同地区气温估算精度方面明显高于一般的线性回归方法^[31-33]。本研究使用普通线性回归(OLS)和地理加权回归(GWR)两种方法,对秦巴山地区气温进行估算,得到山体内外同海拔的温差,以此分析秦巴山地的山体效应。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 MODIS LST 数据 本研究使用2001—2017年NASA MOD11A1的第6版产品,空间分辨率为1 km,温度单位是K。MODIS LST的质量控制文件(QC)的范围为0~255,根据说明文档将其值转换为二进制,并只保留了误差小于1 K的像素^[34]。最后,将通过质量检验的每日白天与晚上的地温数据求月均温,得到秦巴山地2001—2017年1km分辨率的月均地温数据。

2.1.2 气温观测数据 本研究所使用的气温数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)提供的中国地面气候资料月数据集,选取2001—2017年研究区及其周边5 km范围内的118个站点(图1),主要分布在甘肃、陕西、河南、四川、湖北、重庆6个省市。

2.1.3 STRM DEM 数据 本研究采用航天飞机雷达地形测绘任务(STRM-1)的DEM数据,该数据原始坐标系为地理坐标系,空间分辨率为1" (约30 m),本文采用分块下载方式从美国地质调查局网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)下载秦巴山地不同区域的DEM,后拼接为一幅完整的DEM数据。

2.2 研究方法

2.2.1 普通线性回归模型 利用2001—2017年秦巴山地118个气象站点的气温、地表温度

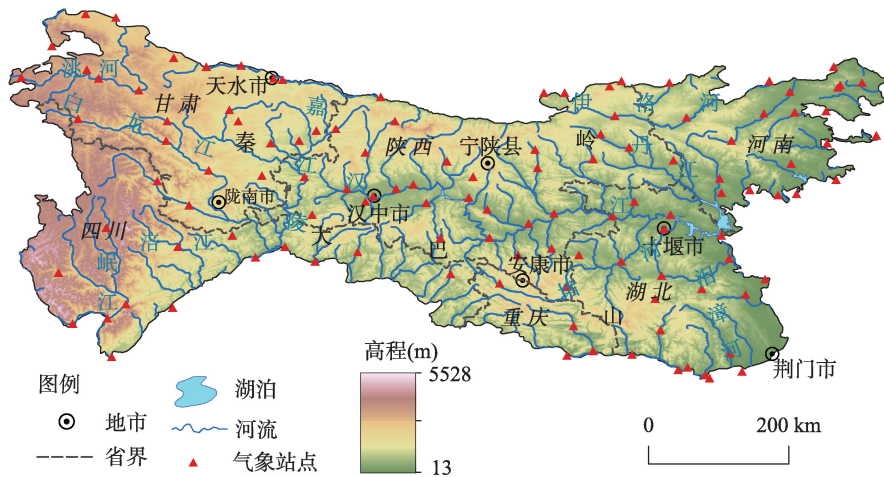


图1 秦岭大巴山气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Qinling-Daba Mountains

和高程数据, 使用最小二乘法分别建立12个月份的普通线性回归模型 (OLS):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (1)$$

式中: Y 为因变量气温; β_0 , β_1 , β_2 为回归系数; X_1 , X_2 分别为解释变量地表温度和高度; ε 为误差项即残差。

2.2.2 地理加权回归模型 地理加权回归模型 (GWR) 是一种区域回归方法, 可以用来研究因变量和解释变量之间的非平稳关系^[35,36]。GWR是对OLS的扩展, 将数据的地理位置嵌入到回归参数中, 利用GWR, 因变量 Y_i 和解释变量 X_k 的关系可以表示为^[37]:

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

式中: (u_i, v_i) 为第 i 采样点的坐标 (如经纬度); $\beta_0(u_i, v_i)$ 和 $\beta_k(u_i, v_i)$ 分别为第 i 个采样点上的截距和自变量的回归系数; ε_i 为第 i 点的回归残差; $i=1, 2, \dots, n$, 表示空间位置的个数。

式中自变量的回归系数根据以下公式得到:

$$\hat{\beta}(u_i, v_i) = (X^T W(u_i, v_i) X)^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y \quad (3)$$

式中: $\hat{\beta}(u_i, v_i)$ 为第 i 个点的局部系数; X 、 Y 分别为解释变量和因变量组成的矩阵; $W(u_i, v_i)$ 为权重矩阵。常见的空间权重函数有高斯函数和双重平方函数, 本研究使用高斯函数:

$$W_{ij} = \exp[-(d_{ij}/b)^2] \quad (4)$$

式中: b 为带宽 (窗口大小); d_{ij} 为样本点 i 和 j 的距离。

为评估模型的拟合度和性能, 本文计算OLS和GWR两类模型的决定系数 (R^2)、校正决定系数 (Adj R^2)、局部决定系数 (Local R^2)、阿凯克信息准则 (AICc)。估算OLS中的K (BP) 值用于确定模型中的解释变量是否与地理空间和数据空间中的因变量具有一致的关系。K (BP) -Pro值 (概率) 小于0.05表示模型具有统计学上的显著异方差性或不稳定性, 则通常适合进行GWR^[38]。使用残差和均方根误差 (RMSE) 反映模型拟合的精确度。

2.2.3 山体效应估算 山体效应本质是山体的增温导致同海拔山体内部温度比外部高的分布格局, 因此可以使用山体内外同海拔的温差表示^[4,39]。为了估算秦巴山地内外同海拔温

差, 本文参照将气温转换为同海拔气温的研究方法^[40,41], 基于公式(5)将各月气温转换至同海拔1500 m(秦巴山地的平均海拔):

$$Ta_h = Ta + (elevation - h) \times \partial \quad (5)$$

式中: h 为指定的海拔高度, 本研究中设为1500 m; Ta_h 为海拔 h 上的气温; Ta 为实际气温; ∂ 为气温的垂直递减率, 本研究按照惯例采用平均气温垂直递减率 $0.006 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ ^[40]。

2.2.4 秦巴山地山体效应的定量分析 为了展示秦巴山地山体效应的变化, 分别选取 33.95°N (经过迭山、太白山、蟒岭、伏牛山)、 32.67°N (经过雪宝顶、米仓山、十堰市等地区), 107.81°E (经过米仓山、汉江、太白山)和 110.52°E (经过神农架、武当山、汉江等地区)4条剖面线做同海拔(1500 m)气温的变化曲线, 分析山体效应随经纬度的变化趋势。由于最热月温度(7月份)和年均温对植被分布影响明显^[25], 因此选取7月份和年均温进行山体效应变化分析。为了展示同海拔气温由山体外部向内部的变化情况, 文中南-北方向上(经过 107.81°E 和 110.52°E 的剖面线)以汉江为界, 分别制作秦岭和大巴山的变化趋势线, 并计算剖面线上同海拔气温随纬度的变化率(同海拔气温差/纬度变化), 定量分析南-北方向上山体效应对气温的影响。

为研究秦巴山地的山体效应的区域差异, 参考中国地貌区划图^[42], 数据来源于北京大学城市与环境学院地理数据平台(<http://geodata.pku.edu.cn>)。结合中国基本地貌类型划分标准^[43], 将秦巴山地分为豫西汉中中山谷地(海拔 $<2000 \text{ m}$, 起伏度 $<500 \text{ m}$)、大巴山大起伏中山(海拔 $<2500 \text{ m}$, 起伏度 $500\sim 2500 \text{ m}$)、秦岭大起伏高中山(海拔 $2000\sim 4000 \text{ m}$, 起伏度 $1000\sim 2500$)和西部大起伏高山(海拔 $4000\sim 6000 \text{ m}$, 起伏度 $1000\sim 2500 \text{ m}$)4个区域(图2)。基于秦巴山地的DEM, 计算得到的四个区域的平均海拔分别为 735.64 m 、 1012.25 m 、 1744.26 m 和 3244.80 m 。计算各区域同海拔(1500 m)各月均和年均温, 分析其他三个区域相对于地势最低的豫西汉中中山谷地的增温量。

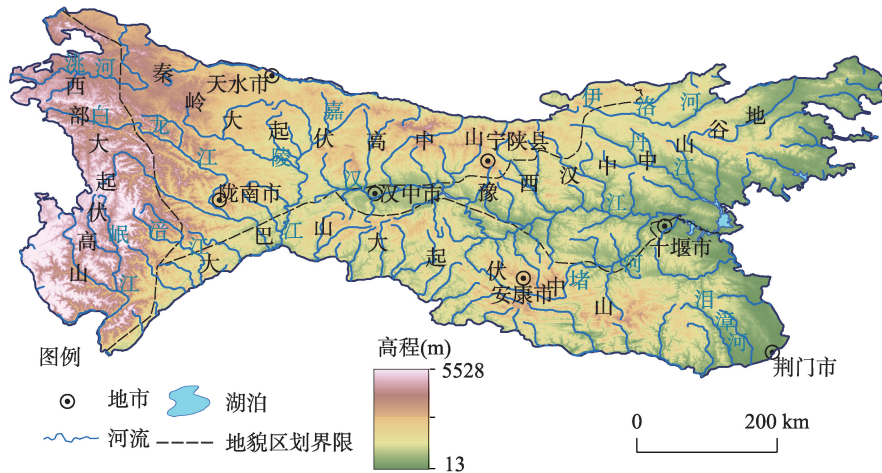


图2 秦巴山地地貌区划

Fig. 2 Landform regionalization in the Qinling-Daba Mountains

3 结果分析

3.1 秦巴山地气温估算

3.1.1 MODIS LST数据精度验证与时序分析 对比2001—2017年气温与地表温度之间的

时序变化特征(图3)发现,秦巴山地各站点的各月均气温与地表温度的相关性很强,只有3个站点(2.54%)的 R^2 在0.8以下, R^2 在0.8-0.9之间的站点有25个(21.19%), R^2 在0.9以上的站点数量达到了90个(76.27%)。气温与地表温度之间的时序变化基本一致,但是各月的地表温度稍高于气温。

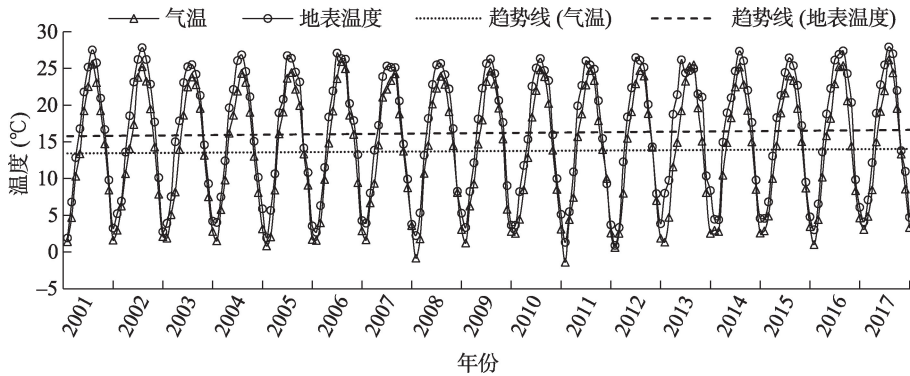


图3 2001—2017年气象站点月均气温与地表温度时序变化趋势

Fig. 3 Temporal variations of monthly mean temperature and surface temperature of meteorological stations in the Qinling-Daba Mountains from 2001 to 2017

3.1.2 OLS 线性分析结果 OLS回归分析结果如表1所示。从决定系数 R^2 和均方根误差RMSE上来看,1—3月 R^2 在0.78~0.79, RMSE也相对较高为1.35~1.53 °C, 5—8月 R^2 在0.9以上, RMSE最小在0.84~0.96 °C, 其他月份 R^2 在0.8~0.9之间, RMSE在1.03~1.35 °C之间。秦巴山地12个月份中除2月份和11月份外,其余月份的K(BP)-Pro值均小于0.05。

3.1.3 GWR 线性分析结果 从各月GWR回归分析结果(表2)能够看出, GWR模型能够明显提高月均温的估算精度,所有月份的 R^2 均在0.89以上, RMSE在0.68~0.98 °C之间,各月的模型拟合度或性能(AICc)也得到了明显提高。秦巴山地各月份局域决定系数(Local R^2) 在0.61~0.97之间,各月份各站点的残差范围在-3.85~5.16 °C之间,但各

表1 各月OLS回归分析结果

Tab. 1 Results of OLS analysis for each month

统计指标	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
R^2	0.78	0.73	0.79	0.88	0.93	0.94	0.94	0.91	0.89	0.89	0.86	0.83
Adj R^2	0.77	0.72	0.78	0.88	0.93	0.94	0.94	0.91	0.89	0.89	0.86	0.83
RMSE(°C)	1.53	1.51	1.35	1.03	0.87	0.84	0.86	0.96	1.05	1.04	1.24	1.35
AICc	443.52	441.11	414.21	350.14	311.29	300.97	307.07	333.51	355.58	353.06	393.06	414.84
K(BP)	8.83	5.84	12.08	14.84	19.12	12.91	12.80	12.45	15.66	12.14	5.19	14.54
K(BP)-Pro	0.0121	0.0540	0.0024	0.0006	0.0001	0.0016	0.0017	0.0020	0.0004	0.0023	0.0745	0.0007

表2 各月GWR回归分析结果

Tab. 2 Results of GWR analysis for each month

统计指标	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
R^2	0.91	0.89	0.91	0.94	0.95	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.92
Adj R^2	0.89	0.87	0.88	0.92	0.94	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.90
RMSE(°C)	0.98	0.94	0.90	0.76	0.71	0.71	0.68	0.71	0.68	0.72	0.78	0.95
AICc	371.91	355.70	352.85	313.12	298.22	295.11	287.10	296.81	286.18	299.42	317.24	365.61

月份残差在-1.2~1.2℃的台站比例均在80%以上，在-2~2℃的台站比例达到94%以上（表3），估算精度相较于OLS方法有了明显的提升。

3.2 秦巴山体效应分析

根据GWR模型估算得到的气温空间分布（图4），区域内年均温与7月份（最热月）的气温变化范围分别为-5.57~18.98℃和5.37~29.30℃。整体呈现东高西低的格局，105°E以西地区年均温与7月份的平均温度分别为6.11℃和15.55℃，而110°E以东地区年均温与7月份的平均温度分别为13.54℃和24.79℃。

3.2.1 秦巴山地同海拔(1500 m)气温及山体效应空间变化 以秦巴山地年均温与7月份的同海拔(1500 m)气温作为代表月份，同海拔气温的空间分布如图5，秦巴山地1500 m海拔年均温的范围为7.25~19.68℃，7月份的范围为17.96~27.98℃。

表3 118个台站气温GWR估算结果精度统计

Tab. 3 Statistics for the results of the GWR estimating model for 118 stations for each month

月份	残差			局域决定系数 (Local R ²)
	范围/℃	-1.2~1.2℃的台站比例/%	-2~2℃的台站比例/%	
1	-3.77~2.90	80.51	96.61	0.67~0.93
2	-3.41~3.37	87.29	96.61	0.61~0.94
3	-3.85~4.02	88.14	97.46	0.63~0.96
4	-2.85~3.50	92.37	98.31	0.72~0.95
5	-2.08~3.91	93.22	98.31	0.81~0.95
6	-1.55~3.52	89.83	99.15	0.81~0.95
7	-1.59~3.45	88.98	99.15	0.78~0.97
8	-2.75~5.16	94.07	98.31	0.78~0.97
9	-1.77~2.60	93.22	98.31	0.78~0.97
10	-2.79~2.33	91.53	98.31	0.78~0.96
11	-2.32~3.38	88.98	97.46	0.79~0.95
12	-3.09~2.56	80.51	94.07	0.68~0.94

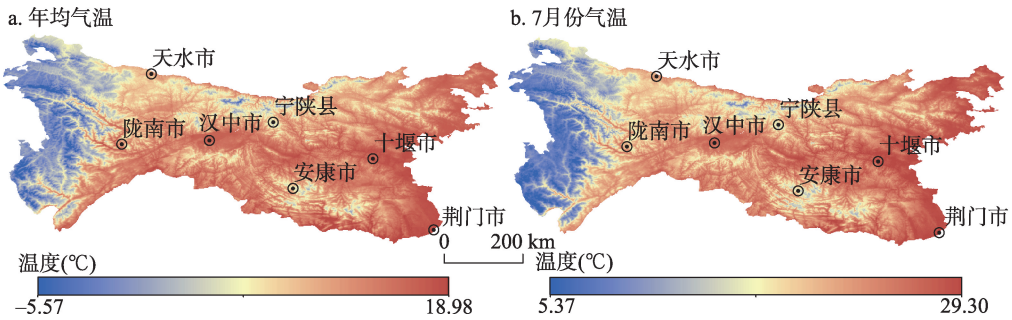


图4 秦巴山地年均温与7月份气温估算结果空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the annual average temperature estimation results and temperature estimation results in July in the Qinling-Daba Mountains

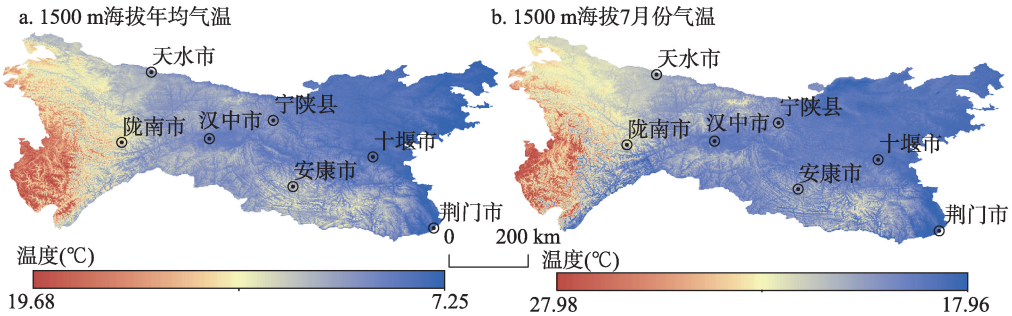


图5 秦巴山地海拔1500 m年均气温与7月份气温空间分布

Fig. 5 The annual average temperature and temperature in July at an altitude of 1500 m in the Qinling-Daba Mountains

秦巴山地自东向西, 同海拔气温呈现出明显的阶梯状上升的趋势(图6和图7), 其中伏牛山区1500 m海拔年均温和7月份均温分别为7.5 ℃和19 ℃左右, 到中段太白山升高至11 ℃和21.5 ℃左右, 再到西部迭山升高至13.5 ℃和23.5 ℃左右。东部十堰市1500 m海拔年均温和7月份均温分别温7 ℃和19 ℃左右, 到中部的米仓山上升到12 ℃和22 ℃左右, 再到东部的红岗山上升到15 ℃和24 ℃左右。

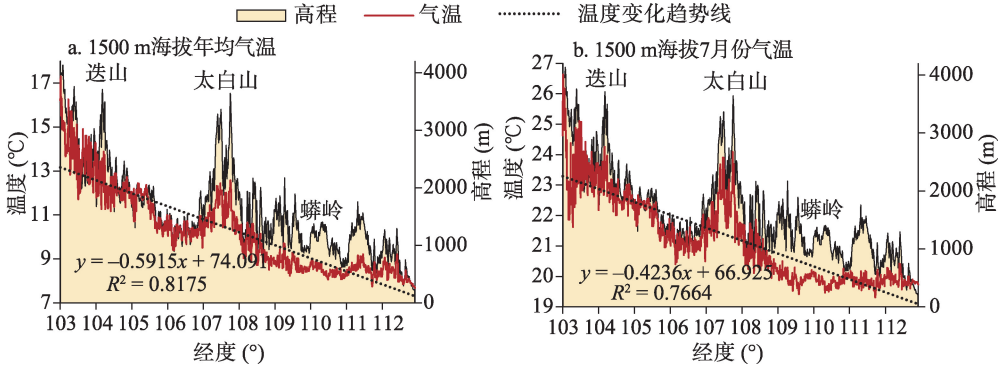


图6 秦巴山地33.95°N剖面线海拔1500 m年均气温与7月份西-东气温变化

Fig. 6 The annual average temperature and temperature in July at an altitude of 1500 m from west to east(33.95°N) in the Qinling-Daba Mountains

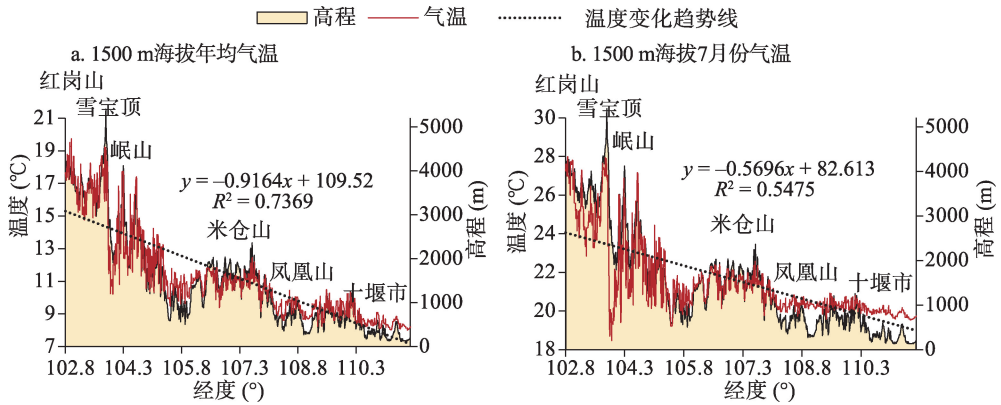


图7 秦巴山地32.67°N剖面线海拔1500 m年均气温与7月份西-东气温变化

Fig. 7 The annual average temperature and temperature in July at an altitude of 1500 m from west to east(32.67°N) in the Qinling-Daba Mountains

秦巴山地南-北方向上同海拔(1500 m)气温呈现出明显的由山体外部向内部升高的趋势(开口向下的抛物线)(图8和图9)。秦岭同海拔(1500 m)年均温和7月份均温由汉江谷地的9 ℃和20 ℃左右上升至山体主峰太白山的11 ℃和22 ℃左右, 升高约2 ℃左右(图8); 大巴山段的1500 m海拔年均温与7月份均温由汉江谷地的9 ℃和20 ℃左右上升至米仓山的11 ℃和21.5 ℃, 升高约1.5~2 ℃; 由汉江谷地的8.5 ℃和20 ℃上升至神农架的12 ℃和22 ℃, 上升约2~3.5 ℃。

根据1500 m海拔年均温、7月均温的纬向变化率(图10, 见第743页), 能够发现南-北方向上, 秦巴山地同海拔气温随纬度的变化率差异明显, 在米仓山约(0.5~2.5)℃/°, 太白山约(0~1.2)℃/°, 神农架约(1~8)℃/°等山地气温随纬度增加而增加, 且越接近山体内部, 纬向变化率越大。而在110.52°E剖面线的汉江以北地区为秦岭的东部边

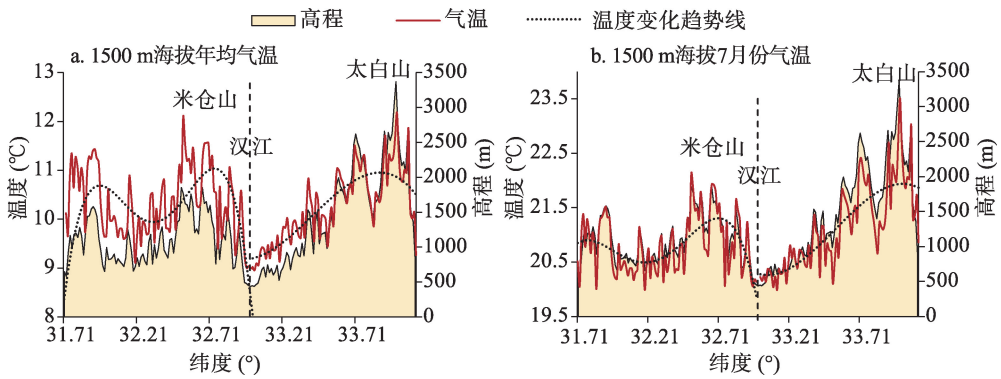


图8 秦巴山地 107.81°E 剖面线海拔 1500 m 年均气温与 7 月份南-北气温变化

Fig. 8 The annual average temperature and temperature in July at an altitude of 1500 m from south to north(107.81°E) in the Qinling-Daba Mountains

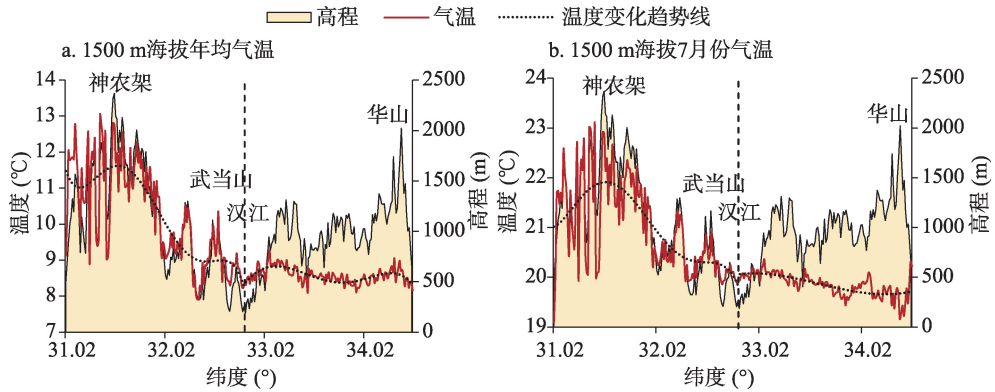


图9 秦巴山地 110.52°E 剖面线海拔 1500 m 年均气温与 7 月份南-北气温变化

Fig. 9 The annual average temperature and temperature in July at an altitude of 1500 m from south to north(110.52°E) in the Qinling-Daba Mountains

缘, 气温随纬度的变化率虽然没有明显为正(-0.5~1)°C/°, 但山体的存在也缩小了气温随纬度的递减率。

3.2.2 秦巴山地山体效应区域差异 通过4个区域的同海拔(1500 m)气温差值对比(见表4, 图11见第744页)能够看出, 西部大起伏高山各月同海拔气温最高(5.40~24.16 °C), 豫西汉中中山谷地最低(-3.87~20.02 °C)。相比地势较低的豫西汉中中山谷地, 西部大起伏高山同海拔气温升高了约3.85~9.28 °C; 秦岭大起伏高中山升高了约1.49~3.34 °C; 大巴山大起伏中山山体气温升高了约0.43~3.05 °C。如果将地势较低的豫西汉中中山谷地作为秦巴山地的外围低地, 计算得到的秦巴山地山体同海拔的内外温差最高达到了9.28 °C, 平均温差约为3.50 °C, 说明秦巴山地的山体效应十分明显。

4 讨论

4.1 秦巴山地的气温估算方法

本研究表明了基于MODIS LST数据的GWR(地理回归加权模型)对气温估算的拟合度和估算精度更高, 各月R²均在0.89以上, RMSE在0.68~0.98 °C之间, 相较于以往使

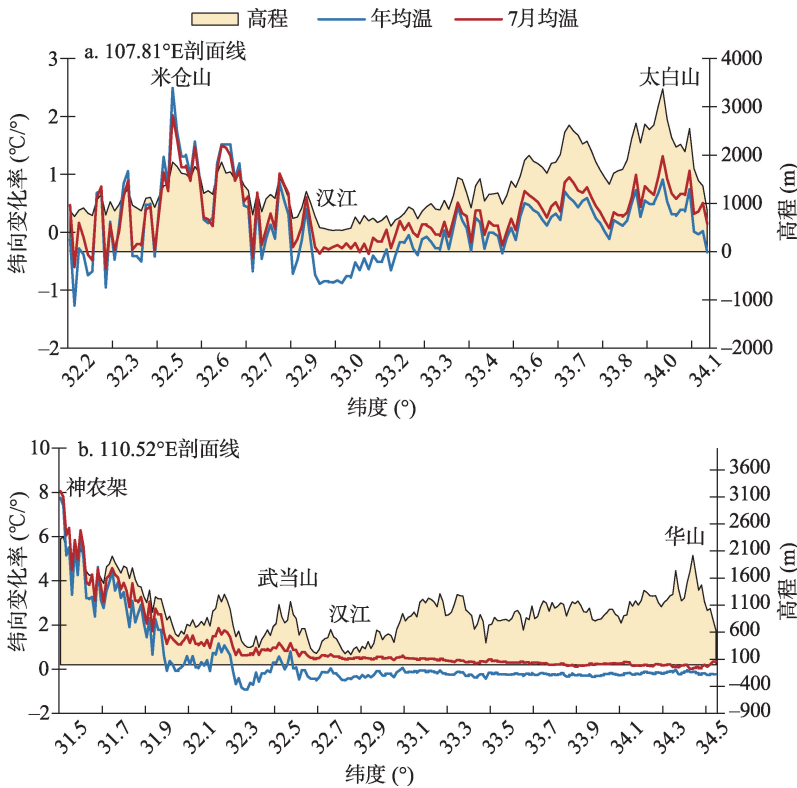


图 10 秦巴山地 107.81°E 剖面线与 110.52°E 剖面线 1500 m 海拔年均温、7 月均温随纬度变化率

Fig. 10 The change rate of the annual average and July temperature at an altitude of 1500 m with the latitude in the Qinling-Daba Mountains 107.81°E section line and 110.52°E section line

表 4 豫西汉中中山谷地与大巴山大起伏中山、秦岭大起伏高中山、西部大起伏高山各月份同海拔 (1500 m) 气温均值及差值

Tab. 4 Monthly mean air temperature and differences between the lower valleys in the Hanzhong and the west of Henan, the Great undulating high mountains in the western Qinling-Daba Mountains, the Great undulating middle-high mountains in the Qinling Mountains and the great undulating middle mountains in the Daba Mountains at an altitude of 1500 m (°C)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均温
豫西汉中中山谷地	-3.87	-0.87	4.19	9.78	14.09	17.98	20.02	18.56	14.27	9.23	3.17	-2.31	8.69
大巴山大起伏中山	-0.83	1.30	5.98	10.99	14.86	18.42	20.76	19.63	15.90	11.20	5.83	0.48	10.38
秦岭大起伏高中山	-0.64	2.47	7.14	12.26	15.98	19.48	21.70	20.67	16.63	11.66	5.66	0.29	11.11
西部大起伏高山	5.40	8.03	10.76	14.85	18.96	21.84	24.16	24.02	20.84	16.51	9.64	5.85	15.10
ΔT 西部大起伏高山-豫西汉中中山谷地	9.28	8.90	6.57	5.07	4.88	3.85	4.15	5.46	6.57	7.28	6.46	8.16	6.41
ΔT 秦岭大起伏高中山-豫西汉中中山谷地	3.23	3.34	2.95	2.47	1.89	1.49	1.68	2.11	2.36	2.42	2.49	2.60	2.42
ΔT 大巴山大起伏高山-豫西汉中中山谷地	3.05	2.17	1.79	1.21	0.77	0.43	0.74	1.07	1.63	1.97	2.66	2.79	1.69

用普通线性回归估算结果的 RMSE=2~3 °C^[44-46]、空间插值方法 (克里金插值的 RMSE=1.56 °C, IDW 插值的 RMSE=1.74 °C, Spline 模型的 RMSE=2.39 °C)^[35]等气温估算方法, GWR 模型对秦巴山地的气温估算的结果较为理想。另外, 由于气温垂直递减率随着纬度, 离海距离会发生变化^[47,48], 本研究采用固定的 0.006 °C/m 将气温计算到统一的海拔, 可能会产生温度估算误差。但目前秦巴山地的气温垂直递减率还没有定论, 有限的气温垂直

递减率的研究仅限于秦巴山地某一座山峰,如太白山^[1],是否能够应用于整个秦巴山地气温估算依然存在不确定性,基于固定的平均气温垂直递减率进行山区温度估算成为山区温度研究的常用方法^[41,49],未来还需要针对不同地区使用不同气温垂直递减率进行气温估算研究。

4.2 秦巴山地山体效应变化原因

秦巴山地从东向西,随着海拔的升高,同海拔气温呈现了明显的升高的趋势,从南向北,以汉江为界,秦岭和大巴山的同海拔气温均呈现出由山体边缘向内部升高的趋势。这与秦巴山地西高东低,以及由汉江谷地向大巴山和秦岭升高的地势有关。随着地势的升高,山坡的斜面可接受到更多的太阳辐射,地面有效辐射及感热加热增强,近地面的气温也就越高^[40,50];并且越靠近山体的中央,降水减少,气候越干燥,土壤湿度减少,地面蒸腾量有限,降低了由地面向大气传导的潜热通量,变相的加剧了高海拔地表的加热效应^[51]。

4.3 秦巴山地山体效应的影响

秦巴山地的山体效应影响了山地垂直带的高度界限和物种多样性。根据雷明德的研究,位于秦岭大起伏高中山区的太白山南坡暖温带常绿阔叶林带的分布上限(1000 m)比汉中地区(870 m)高130 m^[6];太白山落叶阔叶林带上限(2800 m)^[6]比地势相对较低的佛坪自然保护区高300 m^[8];秦巴西部甘南白水江自然保护区针阔混交林带的分布上限(2900 m)^[52],比大巴山东段的神农架南坡(2350 m)^[53]高550 m;西秦岭雪宝顶的暗针叶林带的分布上限(3700 m)^[54]比神农架(3105 m)^[55,56]高595 m;薛智龙^[57]、沈泽昊^[55]、高冠民^[56]等对大巴山段的神农架和米仓山的植物区系的研究表明了神农架物种丰富度高于米仓山。因此,进一步将山体效应的定量化结果用于阐释山地垂直带高度分布的机理以及山区物种多样性,有助于推动山地生态系统的相关研究。

秦巴山地山体效应的存在改变了温度随纬度的增加而递减的变化趋势,纬度偏北的太白山1500 m海拔7月份和年均温比纬度较低的汉江谷地升高了2℃左右,伏牛山和纬度偏南的汉江同海拔温度接近。势必会造成秦岭山地垂直带界限向北或者高海拔地区移动,也影响秦岭暖温带和北亚热带界限的分布。实际上,目前大家认为的南北分界线在秦岭南坡1000 m位置^[58],这一分界线的划定包含了山体效应的影响,若能将山体效应的影响排除,得到的南北分界线则将更为准确,但是山体效应对南北分界线的影响还有待进一步研究。

5 结论

利用MODIS LST数据及气象站点建立的GWR模型能够明显提高秦巴山地气温估算的精度;山体效应的存在造成秦巴山地同海拔气温由东向西呈现阶梯型上升趋势,其中

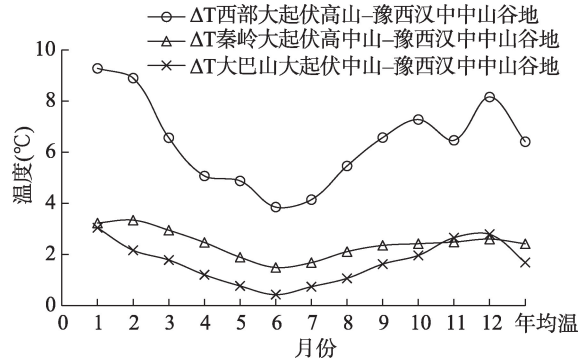


图11 豫西汉中中山谷地与大巴山大起伏中山、秦岭大起伏高中山、西部大起伏高山同海拔1500 m气温差值变化

Fig. 11 Air temperature at an altitude of 1500 m differences (ΔT) between the lower valleys in the Hanzhong and the west of Henan, the Great undulating high mountains in the western Qinling-Daba Mountains, the Great undulating middle-high mountains in the Qinling Mountains and the great undulating middle mountains in the Daba Mountains

迭山同海拔年均温和7月份气温比伏牛山高6℃和4.5℃,比十堰市高8℃和5℃;从南向北山体效应由山体边缘向内部呈现明显升高趋势,其中太白山比汉江谷地上升了2℃左右,且秦巴山地的存在使得同海拔气温的纬向递减率缩小,在山体内部,同海拔气温随纬度的增加甚至呈现了升高的趋势;相比地势较低的豫西汉中中山谷地,秦巴山地西部大起伏高山同海拔气温升高了约3.85~9.28℃;秦岭大起伏高中山升高了约1.49~3.34℃;大巴山大起伏中山山体气温升高了约0.43~3.05℃,秦巴山地山体效应最高达到了9.28℃,平均为3.50℃。秦巴山地的山体效应改变了温度的地带性分布。

参考文献(References)

- [1] Körner C. Worldwide Positions of Alpine Treelines and Their Causes. Berlin: Springer, 1998.
- [2] Körner C. Alpine Treelines: Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] Zhang B P, Yao Y H. Implications of mass elevation effect for the altitudinal patterns of global ecology. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 871-877.
- [4] 张百平,姚永慧. 山体效应研究. 北京: 中国环境出版社, 2015. [Zhang Baiping, Yao Yonghui. Study of Mountain Mass Effect. Beijing: China Environment Press, 2015.]
- [5] 贺文慧. 基于垂直带的山体效应数字模拟——以青藏高原、安第斯山区中段为例. 北京: 中国科学院大学博士学位论文, 2016. [He Wenhui. Digital simulation of mass elevation effect based on altitudinal belt of vegetation —Taking the Qinghai-Tibet Plateau and the middle section of the Andes Mountains as an example. Beijing: Doctoral Dissertation of The University of Chinese Academy of Sciences, 2016.]
- [6] 雷明德. 陕西植被. 北京: 科学出版社, 1999. [Lei Mingde. Shanxi Vegetation. Beijing: Science Press, 1999.]
- [7] 应俊生, 马成功, 张志松. 鄂西神农架地区的植被和植物区系. *中国科学院大学学报*, 1979, 17(3): 41-60. [Ying Junsheng, Ma Chenggong, Zhang Zhisong. Observations of the flora and vegetation of Mt. Shennungia in western Hupeh, China. *Institute of Botany, Academia Sinica*, 1979, 17(3): 41-60.]
- [8] 岳明, 党高弟, 辜天琪. 佛坪国家级自然保护区植被垂直带谱及其与邻近地区的比较. *植物科学学报*, 2000, 18(5): 375-382. [Yue Ming, Dang Gaodi, Gu Tianqi. Vertical zone spectrum of vegetation in Foping National Reserve and the comparison with the adjacent areas. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2000, 18(5): 375-382.]
- [9] 傅志军. 秦巴山地土壤地带性特征. *宝鸡文理学院学报(自然科学版)*, 2004, 24(1): 68-69. [Fu Zhijun. Soil zonal features between Qinling Mountain and Hualong Mountain. *Journal of Baoji University of Arts and Sciences(Natural Science Edition)*, 2004, 24(1): 68-69.]
- [10] 傅抱璞, 虞静明, 李兆元. 秦岭太白山夏季的小气候特点. *地理学报*, 1982, 37(1): 88-97. [Fu Baopu, Yu Jingming, Li Zhaoyuan. Microclimate characteristics of Taibai Mountain in Qinling Mountains in summer. *Acta Geographica Sinica*, 1982, 37(1): 88-97.]
- [11] Tang Z, Fang J. Temperature variation along northern and southern slope of Mt. Taibai, China. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2006, 139(3): 200-207.
- [12] 李双双, 芦佳玉, 延军平, 等. 1970-2015年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义. *地理学报*, 2018, 73(1): 13-24. [Li Shuangshuang, Lu Jiayu, Yan Junping, et al. Spatiotemporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 13-24.]
- [13] 党海山. 秦巴山地亚高山冷杉(*Abies fargesii*)林对区域气候的响应. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉植物园)博士学位论文, 2007. [Dang Haishan. Responses of the subalpine fir (*Abies fargesii*) forests in the Qinba Mountains to regional climatic variability. Wuhan: Doctoral Dissertation of Wuhan Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, 2007.]
- [14] 余显芳. 秦岭山地自然地理. *华南师范学院学报(自然科学版)*, 1958, 37(1): 157-175. [Yu Xianfang. Natural geography of the Qinling Mountain. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 1958, 37(1): 157-175.]
- [15] 应俊生. 秦岭植物区系的性质、特点和起源. *中国科学院大学学报*, 1994, 32(5): 389-410. [Ying Junsheng. An analysis of the flora of Qinling Mountain Range: its nature, characteristics, and origins. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1994, 32(5): 389-410.]
- [16] 罗勇, 张百平. 基于山地垂直带谱的秦岭土地利用空间分异. *地理科学*, 2006, 26(5): 574-579. [Luo Yong, Zhang Baiping. Land use patterns differentiation based on vertical belts in Qinling Mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(5): 574-579.]
- [17] Quervain A D. Die Hebung der atmosphärischen Isothermen in der Schweizer Alpen und ihre Beziehung zu deren Höhen-

- grenzen. *Gerlands Beitr. Geophys.*, 1904, 6: 481-533.
- [18] Grubb P J. Interpretation of the 'Massenerhebung' effect on tropical mountains. *Nature*, 1971, 229(5279): 44.
- [19] Holtmeier F K. *Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2009.
- [20] Troll C. The upper timberlines in different climatic zones. *Arctic and Alpine Research*, 1973, 5(sup3): A3-A18.
- [21] Schickhoff U. The upper timberline in the Himalayas, Hindu Kush and Karakorum: a review of geographical and ecological aspects. *Mountain Ecosystems: Studies in Treeline Ecology*. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 275-354.
- [22] 张朔. 山体效应主要形成因素及其定量化研究. 北京: 中国科学院大学博士学位论文, 2015. [Zhang Shuo. Quantitative study of mass elevation effect based on its main forming-factors. Beijing: Doctoral Dissertation of The University of Chinese Academy of Sciences, 2015.]
- [23] 韩芳, 张百平, 谭靖, 等. 山体基面高度对欧亚大陆东南部林线分布的影响—山体效应定量化研究. *地理学报*, 2010, 65(7): 781-788. [Han Fang, Zhang Baiping, Tan Jing, et al. The effect of mountain base elevation on the altitude of timberline in the Southeastern Eurasia: A study on the quantification of mass elevation effect. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(7): 781-788.]
- [24] 赵芳, 张百平, 庞宇, 等. 山体效应对北半球林线分布的影响分析. *地理学报*, 2012, 67(11): 1556-1564. [Zhao Fang, Zhang Baiping, Pang Yu, et al. Mass elevation effect and its contribution to the altitude of timberline in the Northern Hemisphere. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1556-1564.]
- [25] 赵芳, 朱连奇, 张百平, 等. 欧亚大陆高山林线温度的差异性分析. *生态学报*, 2018, 38(1): 263-272. [Zhao Fang, Zhu Lianqi, Zhang Baiping, et al. Temperature differences of timberlines in the Eurasian continent. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 263-272.]
- [26] Barry R G. A climatological transect on the east slope of the Front Range, Colorado. *Arctic and Alpine Research*, 1973, 5(2): 89-110.
- [27] Rao G V, Erdogan S. The atmospheric heat source over the Bolivian plateau for a mean January. *Boundary-Layer Meteorology*, 1989, 46(1-2): 13-33.
- [28] Zhang H B, Zhang F, Ye M, et al. Estimating daily air temperatures over the Tibetan Plateau by dynamically integrating MODIS LST data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(19): 11, 425-11, 441.
- [29] Benali A, Carvalho A C, Nunes J P, et al. Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 108-121.
- [30] Zhang H B, Zhang F, Zhang G Q, et al. Daily air temperature estimation on glacier surfaces in the Tibetan Plateau using MODIS LST data. *Journal of Glaciology*, 2018, 64(243): 132-147.
- [31] 姚永慧, 张百平. 基于MODIS数据的青藏高原气温与增温效应估算. *地理学报*, 2013, 68(1): 95-107. [Yao Yonghui, Zhang Baiping. MODIS-based estimation of air temperature and heating-up effect of the Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(1): 95-107.]
- [32] Yao Y H, Xu M, Zhang B P. The implication of mass elevation effect of the Tibetan Plateau for altitudinal belts. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(12): 1411-1422.
- [33] 姚永慧, 张百平. 青藏高原气温空间分布规律及其生态意义. *地理研究*, 2015, 34(11): 2084-2094. [Yao Yonghui, Zhang Baiping. The spatial pattern of monthly air temperature of the Tibetan Plateau and its implications for the geology pattern of the Plateau. *Geographical Research*, 2015, 34(11): 2084-2094.]
- [34] Wan Z. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(1): 59-74.
- [35] Wang M M, He G J, Zhang Z M, et al. Comparison of spatial interpolation and regression analysis models for an estimation of monthly near surface air temperature in China. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1278.
- [36] Propastin P, Kappas M, Erasmi S. Application of geographically weighted regression to investigate the impact of scale on prediction uncertainty by modelling relationship between vegetation and climate. *IJSDIR*, 2008, 3: 73-94.
- [37] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. *Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships*. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [38] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial non-stationarity. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.
- [39] 王婧, 张百平, 张文杰, 等. 科罗拉多落基山脉山体效应定量化研究. *地理研究*, 2017, 36(8): 1467-1477. [Wang Jing, Zhang Baiping, Zhang Wenjie, et al. Quantitative research of mass elevation effect in Colorado Rocky Mountains. *Geographical Research*, 2017, 36(8): 1467-1477.]

- [40] Barry R G. Mountain Weather and Climate. London: Routledge, 1992.
- [41] Jobbágy E G, Jackson R B. Global controls of forest line elevation in the northern and southern hemispheres. *Global Ecology and Biogeography*, 2000, 9(3): 253-268.
- [42] 廖克. 中华人民共和国国家自然地图集. 北京: 中国地图出版社, 1999. [Liao Ke. National Natural Atlas of the People's Republic of China. Beijing: SinoMaps Press, 1999.]
- [43] 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨. 第四纪研究, 2008, 28(4): 535-543. [Li Bingyuan, Pan Baotian, Han Jiafu. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 535-543.]
- [44] Yao Y H, Zhang B P. MODIS-based air temperature estimation in the southeastern Tibetan Plateau and neighboring areas. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(1): 152-166.
- [45] Vancutsem C, Ceccato P, Dinku T, et al. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 449-465.
- [46] Zhu W B, Lü A, Jia S F. Estimation of daily maximum and minimum air temperature using MODIS land surface temperature products. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 130: 62-73.
- [47] Li X P, Wang L, Chen D L, et al. Near-surface air temperature lapse rates in the mainland China during 1962 - 2011. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(14): 7505-7515.
- [48] 方精云. 我国气温直减率分布规律的研究. 科学通报, 1992, (9): 817-820. [Fang Jingyun. Study on the distribution of air temperature lapse rates in China. *Chinese Science Bulletin*, 1992, (9): 817-820.]
- [49] Fang J Y, Lechowicz M. Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus L.*) species in the world. *Journal of Biogeography*, 2006, 33(10): 1804-1819.
- [50] Yeh T C. Some aspects of the thermal influences of the Qinghai-Tibetan Plateau on the atmospheric circulation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1982, 31(3): 205-220.
- [51] Molnar P, Emanuel K A. Temperature profiles in radiative-convective equilibrium above surfaces at different heights. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D20): 24265-24271.
- [52] 孙国钧, 冯虎元. 白水江自然保护区植被区系特征分析. 兰州大学学报(自然科学版), 1998, 34(2): 92-97. [Sun Guojun, Feng Huyuan. The analysis of flora characteristics Baishuijiang Natural Sanctuary in Gansu. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1998, 34(2): 92-97.]
- [53] 方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容. 生物多样性, 2004, 12(1): 10-19. [Fang Jingyun, Shen Zehao, Cui Haiting. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 10-19.]
- [54] 郑远昌, 高生淮, 柴宗新, 等. 试论横断山地区自然垂直带. 山地研究, 1986, 4(1): 75-83. [Zheng Yuanchang, Gao Shenghuai, Chai Zongxin, et al. A preliminary study on the vertical natural zones in the Hengduan Mountainous region. *Mountain Research*, 1986, 4(1): 75-83.]
- [55] 沈泽昊, 胡会峰, 周宇, 等. 神农架南坡植物群落多样性的海拔梯度格局. 生物多样性, 2004, 12(1): 99-107. [Shen Zehao, Hu Huifeng, Zhou Yu, et al. Altitudinal patterns of plant species diversity on the southern slope of Mt. Shennongjia, Hubei, China. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 99-107.]
- [56] 高冠民. 神农架山地垂直自然带. 山地研究, 1986, 4(4): 282-286. [Gao Guanmin. The natural vertical zone of Shennongjia Mountain. *Mountain Research*, 1986, 4(4): 282-286.]
- [57] 薛智龙, 王俊明. 大巴山西段陕西米仓山自然保护区的植被及分布. 陕西林业科技, 2010, (6): 27-31. [Xue Zhilong, Wang Junming. Vegetation distribution pattern in micang nature reserve located in the west part of bashan mountains. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2010, (6): 27-31.]
- [58] 康慕谊, 朱源. 秦岭山地生态分界线的论证. 生态学报, 2007, 27(7): 2774-2784. [Kang Muyi, Zhu Yuan. Discussion and analysis on the geo-ecological boundary in Qinling Range. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2774-2784.]

Estimation of air temperature based on MODIS and analysis of mass elevation effect in the Qinling-Daba Mountains

LIU Junjie^{1,2}, PAN Ziwu^{1,2}, QIN Fen^{1,2,3}, GU Jiangyan¹, ZHU Mingyang¹, ZHAO Fang¹

(1. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China; 2. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Kaifeng 475004, Henan, China;

3. Henan Industrial Technology Academy of Spatio-Temporal Big Data, Henan University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: As a huge mountain range in the North-South boundary of China, the Qinling-Daba Mountains are characterized by prominent mass elevation effect (MEE) and play an important role in theazonality pattern of climate and ecology in central China. The essence of the MEE is the warming effect of mountains, as huge mountain and plateau absorbs more solar radiation compared with the free atmosphere of the same altitude and then releases in the form of long-wave radiation external heat, making the internal mountain temperature higher than the external in the same altitude of free atmosphere. Therefore, the temperature difference between the mountain interior and the periphery has been suggested as an appropriate indicator to quantify the MEE. To analyze MEE of the Qinling-Daba Mountains, MODIS land surface temperature (LST) data, STRM-1 DEM data and observation data from 118 meteorological stations were combined to estimate monthly mean air temperature by ordinary linear regression (OLS) and geographical weighted regression (GWR) methods in the Qinling- Daba Mountains. Air temperature at an altitude of 1500 m (the average elevation of the Qinling-Daba Mountains) in the interior of the Qinling-Daba Mountains was calculated by a fixed lapse rate and compared with that in the periphery. The results show that: (1) Compared with OLS method, the GWR method has higher accuracy with $R^2 > 0.89$ and the root mean squared error (RMSE) = 0.68–0.98 °C. (2) The monthly mean temperature at the altitude of 1500 m estimated by GWR presents a gradual upward trend from east to west. In the western Qinling Mountains, the annual average temperature and temperature in July at the altitude of 1500 m increase about 6 °C and 4.5 °C compared with the eastern flank, while in the Daba Mountains, they are about 8 °C and 5 °C higher in the west than in the east. (3) From south to north, with the Hanjiang River as the boundary, the monthly mean temperature at the altitude of 1500 m tends to rise from the rim of the mountains to the ridge. (4) Compared with the lower valleys in Hanzhong and western Henan, the monthly mean temperatures at the altitude of 1500 m are approximately 3.85–9.28 °C, 1.49–3.34 °C and 0.43–3.05 °C higher those in the great undulating high mountains in the western Qinling- Daba Mountains, the great undulating middle- high mountains in the Qinling Mountains and the great undulating middle mountains in the Daba Mountains, respectively, and the average temperature difference is about 3.50 °C. This shows that the MEE of the Qinling- Daba Mountains is obvious and its impact on the distribution patterns of mountain climate and ecology needs to be further studied.

Keywords: mass elevation effect; Qinling-Daba Mountains; MODIS land surface temperature; temperature estimation; geographical weighted regression