

引用格式:李午阳,兰鑫灿,唐家乐,赵芳,连沅媛.地表反照率和蒸散发对秦巴山地增温效应的影响[J].山地学报,2022,40(4):614-625.

LI Wuyang, LAN Xincan, TANG Jiale, ZHAO Fang, LIAN Yuanyuan. Influence of albedo and evapotranspiration on the mass elevation effect in the Qinling-Daba Mountains of China [J]. Mountain Research, 2022, 40(4):614-625.

# 地表反照率和蒸散发对秦巴山地增温效应的影响

李午阳<sup>1</sup>, 兰鑫灿<sup>1</sup>, 唐家乐<sup>1</sup>, 赵芳<sup>1, 2\*</sup>, 连沅媛<sup>1</sup>

(1. 河南大学 地理与环境学院, 河南 开封 475004; 2. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南 开封 475004)

**摘要:** 山体增温效应是山体内部温度高于山体外部的主要原因, 山区地-气热量交换是山体增温效应形成的机制。本文聚焦于地-气热量交换过程的关键地表参数, 以 2008—2018 年的 MODIS 数据为基础, 计算地表反照率 (Alb)、蒸散发 (ET)、归一化植被指数 (NDVI) 和归一化水指数 (NDWI) 等数据, 结合秦巴山地的同海拔地表温度数据 (LST), 使用随机森林算法, 分析地表反照率 (Alb) 和蒸散发 (ET) 对秦巴山地和秦巴山地内四个典型区 (伏牛山、太白山、神农架、迭山等及其周边) 增温效应的影响。结果表明: (1) 秦巴山地及内部典型区山体增温效应差异较大, 这种增温效应与所选取的影响因素有很强的相关性, 二者之间的  $R^2$  均在 0.62 以上。 (2) 除伏牛山及周边区域外, Alb 和山体增温效应的变化趋势呈现一致性, 说明地表反照率越高, 山体增温效应越大, 其中太白山及周边区域 Alb 对山体增温效应的影响最大, 其变量重要性 (VI) 值达到 0.68。 (3) 除迭山及周边区域外, ET 和山体增温效应呈现相反的变化趋势, 说明 ET 的升高在一定程度上减弱了山体的增温效应, 其中神农架及周边区域 ET 影响最大, 其 VI 值达到 0.88, 在太白山及周边区域, ET 影响仅次于 Alb, VI 值达到 0.62。本研究使用同海拔 LST 数据作为山体增温效应的代用因子, 并在秦巴山地及其内部尺度分析各因素对增温效应的影响程度及 Alb 和 ET 对山体增温效应的影响, 突破了以往山体增温效应研究对宏观尺度 (大陆尺度、全球尺度) 山地垂直带界限分布和区域尺度温度站点设置依赖的局限, 为山体增温效应研究由宏观向微观的机理研究提供参考。

**关键词:** 山体增温效应; 随机森林; 地表温度; 蒸散发; 地表反照率; 秦巴山地

**中图分类号:** K909

**文献标志码:** A

山体效应指大型山地或高原内部温度高于外围低山区同海拔自由大气温度, 导致山地垂直带界线由大型山地或高原外围向内部逐渐升高的现象<sup>[1-6]</sup>。山体效应的存在干扰和扭曲了地带性要素的作用强度, 形成了高度异质性的地球表面地理生态格局<sup>[3, 7-10]</sup>。山体效应的相关研究多定性地对不同地区山体内外生活型和植物区系相似的植被分布界线<sup>[11-14]</sup>, 使用地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 和山体内外同海拔温差, 确定山体增温效应的大小和强度<sup>[5-6]</sup>。随着山体基面高度

的发现及山体效应概念模型的提出<sup>[11]</sup>, 研究人员。基于山区山体内外同海拔的温差估算了落基山、安第斯山、青藏高原等山区的山体增温强度<sup>[4-6, 17-18]</sup>。

山体效应定量化是山体效应研究的重大突破, 但目前山体效应的计算依赖于山系内外气象站点的分布<sup>[5-6, 17-19]</sup>, 由于复杂山区站点分布极不均匀, 尤其是山体效应强烈的高山地区, 大都没有站点布置, 导致温差计算值不能很好地反映高山地区山体增温效应。为获取山区内外同海拔温度, 常使用统一的垂直递减率用于山区不同海拔温度的估

收稿日期 (Received date): 2021-11-11; 改回日期 (Accepted date): 2022-07-26

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41601091)。[National Natural Science Foundation of China (41601091)]

作者简介 (Biography): 李午阳 (1996-) 男, 河南商丘人, 硕士, 主要研究方向: 山体效应。[LI Wuyang (1996-), male, born in Shangqiu, Henan province, M. Sc., research on mass elevation effect] E-mail: 104753190127@henu.edu.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 赵芳 (1984-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 山地地理、山地生态环境。[ZHAO Fang (1984-), female, Ph. D., associate professor, research on mountain geography and mountain ecology environment] E-mail: zhaofang84@163.com

算<sup>[18-20]</sup>,在一定程度上忽略了山区气温垂直递减率的变化复杂性<sup>[21-22]</sup>。降水大陆度、纬度(Latitude, LAT)和基面高度(Mountain Base Elevation, MBE)用于山体增温效应的解释<sup>[12, 14-15, 18, 23]</sup>,尽管它们对不同的山系/高原山体增温效应的解释达到了60%以上<sup>[4, 18, 24]</sup>,但是无法从机理上解释山系/高原内部同海拔温度的复杂变化。

山系内部山体增温效应与热量平衡过程的不同分量有关,其中包括LST、地表反照率(Albedo, Alb)和蒸散发(Evapotranspiration, ET)。Alb和ET是影响LST的两个重要的生物物理因素<sup>[25]</sup>。Alb指地表反照太阳辐射能量与入射太阳辐射能量的比值,是决定地表能量收支平衡的重要因素,在促进山地增温过程中起着重要的作用<sup>[26]</sup>。Alb决定吸收的太阳辐射量,这些能量会以潜热通量和感热通量形式消耗<sup>[27]</sup>。ET是土壤和大气之间能量交换的主要途径<sup>[28]</sup>。除此之外,坡向(Aspect, Asp)和坡度(Slope, Slp)<sup>[29]</sup>、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)<sup>[30]</sup>、土地覆被类型(Land Cover Type, LCT)<sup>[31-32]</sup>、归一化水分指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)<sup>[33]</sup>和MBE<sup>[23]</sup>等也能影响LST和山体增温效应。

秦岭—大巴山是我国中部的重要山脉,是联系青藏高原和东部平原的生态廊道,为中国暖温带和北亚热带过渡地带。对秦巴山地的山体增温效应进行定量研究和机理分析,有助于揭示秦巴山地生态环境变化的复杂性和多样性。本研究以秦巴山地及秦巴山地内部山体增温效应变化明显的四个典型区(伏牛山、太白山、神农架、迭山及所在的周边区域)为研究区,首先选取不同区域的同海拔处LST作为山体增温效应的代用因子,分析秦巴山地及内部典型区山体增温效应的空间格局。然后结合Alb、ET、NDVI、NDWI、LCT、Slp、Asp、LAT和MBE,采用随机森林方法分析不同指标对同海拔LST变化的贡献,展示Alb和ET对同海拔LST的相对重要性。最后分析不同典型区Alb和ET的变化趋势及与山体增温效应的关系,探索Alb和ET对山体增温效应的影响,进而为山体增温效应向微观尺度的研究提供参考。

## 1 研究区概况

秦巴山地位于30°N~36°N, 101°E~114°E,跨

越陕西、甘肃、四川、重庆、湖北和河南六省,东西长约1000 km,面积约为 $3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。秦巴山地中部和东部处于我国暖温带和北亚热带过渡区,地带性特征明显,植被类型多样,北部为秦岭山脉,其北坡植被类型主要为暖温带落叶阔叶林带,南部为大巴山脉,其南坡主要为北亚热带常绿阔叶林,中间以汉江为界,汉江两侧为暖温带—北亚热带过渡地带,分布常绿-落叶阔叶混交林。秦巴山地自西向东地势逐渐降低,西部承接青藏高原,是秦巴山地海拔最高的区域,分布迭山、雄黄山、雪宝顶等,最高海拔高达5528 m。东部与平原相连,秦岭山脉东部分布伏牛山、华山等,海拔多在1000~1500 m,最高峰鸡角尖海拔为2212 m。大巴山脉东部海拔略高于秦岭山脉,主峰神农架可达3105 m。

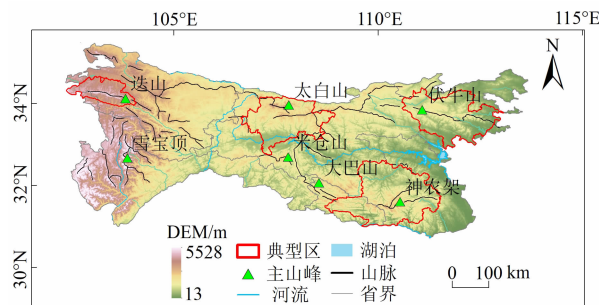


图1 秦巴山地范围及典型区分布

Fig. 1 Location map of the Qinling-Daba Mountains of China and the typical areas

## 2 数据和方法

### 2.1 地形数据

地形因子是山体增温效应变化的重要因素<sup>[34-35]</sup>。研究发现,山系尺度、全球和半球尺度山体基面高度是山体效应的重要因素<sup>[8-10, 15, 18, 23]</sup>。一般来说,山体基面高度越高,山体增温效应越大<sup>[4, 36]</sup>。但是在局部尺度,坡度和坡向也能够影响山区温度和辐射变化<sup>[12, 37]</sup>。本文选择山体基面高度、坡度和坡向分析秦巴山地典型区同海拔地表温度变化。地形数据来源于美国航空航天局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)提供的空间分辨率为30 m的DEM。秦巴山地山体基面高度数据的提取和分布参考刘俊杰<sup>[38]</sup>的研究结果,坡度和坡向分布如图2所示。

### 2.2 遥感数据

除地形因子外,山系内部影响热量分配,影响太

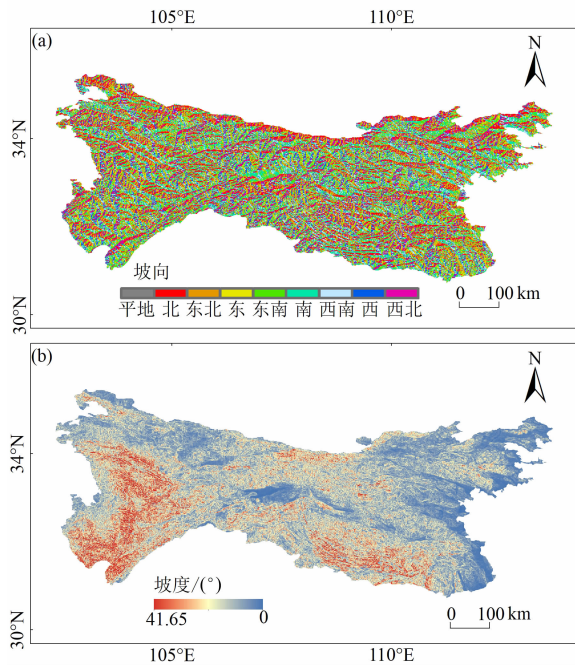


图 2 秦巴山地坡度和坡向图:

(a) 坡向; (b) 坡度

Fig. 2 Aspect and slope map of the Qinling-Daba Mountains:

(a) aspect; (b) slope

阳辐射和地面辐射的指标还包括  $Alb^{[39]}$ 、 $NDVI^{[30]}$ 、 $LCT^{[31]}$ 、 $NDWI^{[33]}$  和  $ET^{[40]}$ 。考虑到 Terra-MODIS 卫星的广泛应用及其产品的精度,本研究基于 MODIS 遥感数据获取这些指标及地表温度。本研究使用遥感 Terra-MODIS 产品 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),其中包括 MOD11A1、MOD09A1、MOD13A2、MCD12Q1 和 MOD16A2,从中获取影响因子,数据详情见表 1。

本文选择 2008—2018 年的 MODIS 数据产品 (表 1),基于 MRT(MODIS Reprojection Tool)软件对 MODIS 数据进行镶嵌、投影变换和裁剪,转换为 WGS-84 坐标投影,分别从不同的产品中提取 LST、NDVI、ET 和 LCT 波段数据,根据公式(1)和(2)计算 NDWI 和  $Alb$ 。将 NDWI、NDVI、 $Alb$ 、LCT 和 ET 数据的空间分辨率数据重采样到 1 km 分辨率,与地表温度空间分辨率保持一致,并计算 2008—2018 年 LST、NDWI、NDVI、 $Alb$  和 ET 等数据的年平均值。LCT 的覆被类型总共分为 17 类,除这 17 类覆被类型外,本文将 2008—2018 年发生转变的覆被类型定义成其他类型。

表 1 MODIS 数据产品及提取的变量

Tab. 1 Variables obtained from MODIS data products

MODIS 数据产品	提取的变量	空间分辨率/m
MOD11A1	地表温度 (LST)	1000
MOD09A1	归一化水分指数 (NDWI)	500
MOD13A2	归一化植被指数 (NDVI)	500
MOD09A1	地表反照率 ( $Alb$ )	500
MCD12Q1	土地覆被类型 (LCT)	500
MOD16A2	蒸散发 (ET)	500

归一化水分指数计算如下:

$$NDWI = \frac{R_2 - R_7}{R_2 + R_7} \quad (1)$$

式中,  $R_2$  和  $R_7$  分别为 MOD09A1 数据产品的波段 2 和波段 7 数据。

本文采用梁顺林<sup>[41]</sup>的方法基于 MODIS 地表反射率波段数据计算得到地表反照率为:

$$Alb = 0.160\alpha_1 + 0.291\alpha_2 + 0.243\alpha_3 + 0.116\alpha_4 + 0.112\alpha_5 + 0.081\alpha_7 - 0.0015 \quad (2)$$

式中,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 、 $\alpha_5$ 、 $\alpha_7$  分别为 MOD09A1 数据产品的波段 1、波段 2、波段 3、波段 4、波段 5 和波段 7 数据。

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 山体增温效应分析

过去山体增温效应的定量化依赖于山区气象站点的分布和气温垂直递减率的变化。但是山区气象站点分布不均以及山区气温垂直递减率分布的复杂性,使得山体增温效应量化过程中存在较大的不确定性<sup>[7]</sup>。考虑到地表温度在地面与植被之间的能量分配和生物物理过程的作用<sup>[42]</sup>,为了减少从地表温度转换到空气温度,以及使用统一的气温垂直递减率转换到同海拔温度来量化山体增温效应造成的误差,本研究采用 MODIS 的 2008—2018 年白天的地表温度 (LST) 均值数据,在秦巴山地及其内部的四个典型区 (图 1) 提取平均海拔处的 LST,分析不同区域山体增温效应的变化,并基于不同区域同海拔 LST 与其最小值的差值来估算山体增温强度。

### 2.3.2 随机森林

随机森林(Random forest, RF)由 Breiman<sup>[43]</sup>于 2001 年提出,是一种用于分类、回归等任务的集成学习方法。随机森林被广泛应用于变量重要性的评分研究<sup>[44]</sup>、地表温度的降尺度研究<sup>[45-46]</sup>,以及复杂地形下的地表温度和其他因素之间的关系的判断<sup>[47]</sup>。本文选择同海拔地表温度作为因变量,与地表温度变化有关的 LAT、NDWI、NDVI、ET、LCT、Alb、Slp、Asp 和 MBE 九个指标作为影响因子。采用随机森林建立 LST 与影响因子之间的非线性链接模型,分析影响因子与同海拔地表温度的关系:

$$LST = f(LAT, NDWI, NDVI, ET, LCT, Alb, Slp, Asp, MBE) \quad (3)$$

目前随机森林的重要测度指标主要有两种:基于 Gini 指数的平均不纯度减少指标和基于袋外(out-of-bag, oob)数据置换的平均精确度减少指标<sup>[48-50]</sup>。由于置换法有更好的非偏倚性,能够直接度量每个解释变量对模型精确率的影响程度,当连续变量和分类变量数目不同时,不会引起精度的变化<sup>[51]</sup>。RF 算法利用袋外误差(oob)计算特征变量的重要性(VI),一般来说,特征变量的变化引起袋外误差的增加越大,VI 减少的越多,说明该变量的重要性越大<sup>[44, 50]</sup>。本文根据 VI 分析不同影响因子对同海拔地表温度变化的重要性,解释 ET 和 Alb 在不同典型区对山体增温效应的影响。

## 3 结果及分析

### 3.1 秦巴山地地表反照率和蒸散发对山体增温效应的影响

秦巴山地 2008—2018 年平均地表温度变化范围为  $-1.37^{\circ}\text{C} \sim 26.18^{\circ}\text{C}$ (图 3a)。由西向东平均地表温度呈升高趋势,其中最低地表温度位于西南区域,最高地表温度位于东部。秦巴山地 2008—2018 年平均海拔(1500 m)地表温度主要分布在西部和东部部分地区,1500 m 海拔地表温度变化范围为  $11.01^{\circ}\text{C} \sim 23.60^{\circ}\text{C}$ (图 3b),由西向东同海拔地表温度整体呈降低趋势,最高温分布在西北部,最低温位于中北部地区。表明秦巴山地的山体增温效应格局是西部高于东部。

使用随机森林方法分析秦巴山地九个影响因素

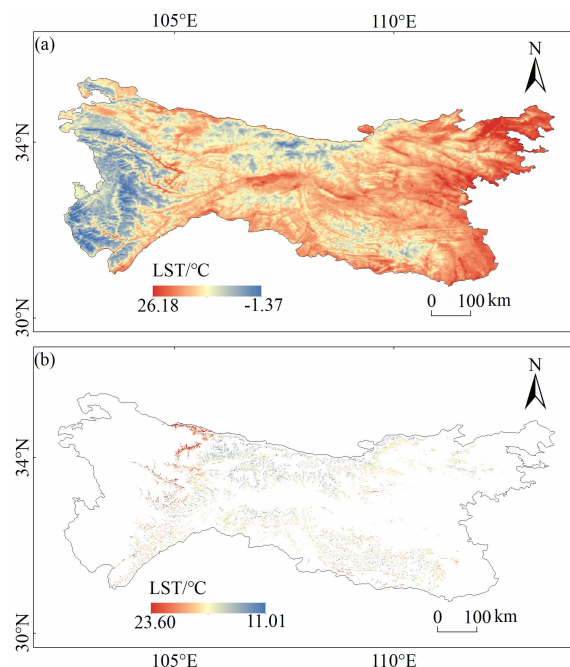


图 3 2008—2018 年平均 LST:

(a) 秦巴山地年平均 LST; (b) 1500 m 海拔年平均 LST

Fig. 3 Mean annual LST from 2008 - 2018;

(a) mean annual LST in the Qinling-Daba Mountains;

(b) mean annual LST at elevation of 1500 m

与同海拔地表温度年均温的关系,这些影响因子与同海拔地表温度之间显著相关( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.81$ )。其中 Alb 和 ET 的 VI 值分别为 0.88 和 1.13(图 4),Alb 在秦巴山地对地表增温效应的影响低于 ET。秦巴山地 Alb 和 LST 变化趋势相同;ET 和 LST 变化趋势相反(图 5)。山体增温效应最大区域位于西北部各县市,同海拔平均 LST 为  $19.00^{\circ}\text{C} \sim 21.00^{\circ}\text{C}$ ,Alb 为  $0.16 \sim 0.18$ ,ET 为  $418.44 \sim 459.37 \text{ mm}$ ;山体增温效应最小的区域位于中北部各县市,同海拔平均 LST 为  $13.40^{\circ}\text{C} \sim 14.00^{\circ}\text{C}$ ,Alb 为  $0.12 \sim 0.13$ ,ET 为  $471.33 \sim 487.52 \text{ mm}$ ;在该区域山体增温效应随 Alb 的增大而增大,随着 ET 的增大而减小。

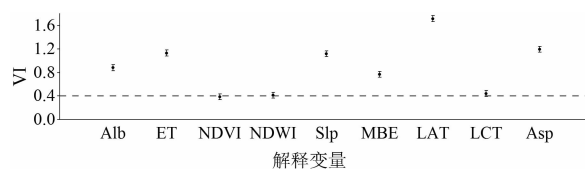


图 4 各解释变量重要性(VI)分析

Fig. 4 Importance analysis of explanatory variables



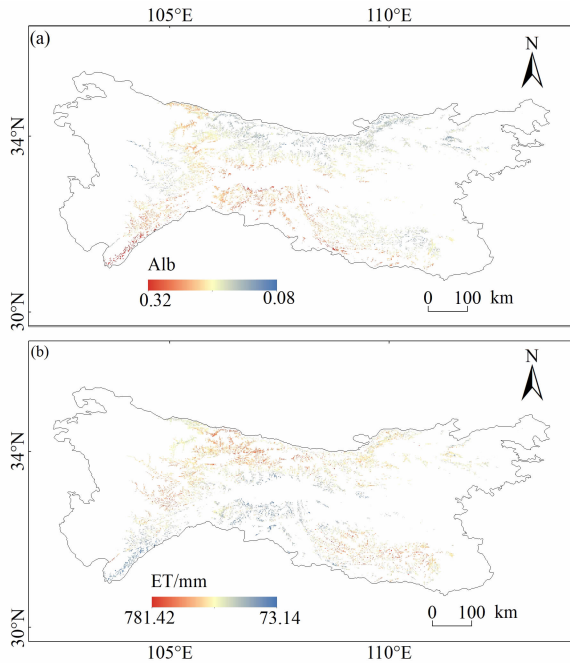


图 5 秦巴山地平均海拔(1500 m)处 Alb 和 ET 空间分布:(a) Alb;(b) ET

Fig. 5 Spatial distribution of Alb and ET of average elevation (1500 m) in the Qinling-Daba Mountains: (a) Alb; (b) ET

### 3.2 秦巴山地各典型区地表反照率和蒸散发对增温效应的影响

#### 3.2.1 典型区的同海拔地表温度分布

根据四个典型区平均海拔处的地表温度分布(图 6),伏牛山及周边区域(749 m),同海拔 LST 北高南低,西部高于东部。南部各县市同海拔 LST 为  $19.12^{\circ}\text{C} \sim 20.00^{\circ}\text{C}$ ,北部为  $19.22^{\circ}\text{C} \sim 20.43^{\circ}\text{C}$ ,西部为  $19.18^{\circ}\text{C} \sim 20.43^{\circ}\text{C}$ ,东部为  $19.17^{\circ}\text{C} \sim 20.09^{\circ}\text{C}$ 。表明伏牛山及周边区域山体增温效应北高南低,西高东低,山体增温效应最高分布在西北部的卢氏县区域,最低分布在东部的南召县区域。神农架及周边区域(1083 m),同海拔 LST 由西南向东北先降低后升高。西南部各县市同海拔 LST 在  $17.95^{\circ}\text{C}$  以上,东北部为  $17.92^{\circ}\text{C} \sim 18.59^{\circ}\text{C}$ ,中部神农架林区为  $16.87^{\circ}\text{C}$ 。表明神农架及周边区域山体增温效应由西南向东北呈先降低后升高趋势,山体增温效应最大分布在西南部的巫山县,最小分布在中部区域的神农架林区。太白山及周边区域(1441 m),同海拔 LST 南高北低,东西变化不显著。南部各县市同海拔 LST 在  $15.36^{\circ}\text{C}$  以上,北部为  $13.55^{\circ}\text{C} \sim 15.08^{\circ}\text{C}$ 。表明太白山及周边区域山体

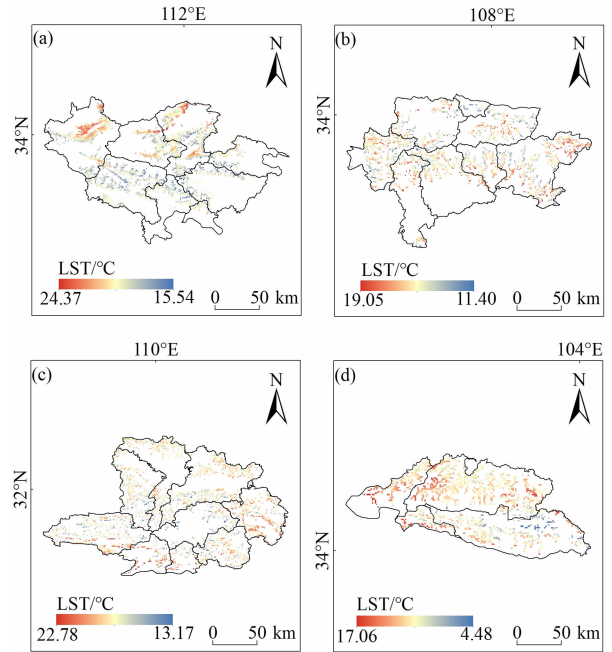


图 6 四个典型区及其周边区域平均海拔处

LST 分布图:(a) 伏牛山;(b) 太白山;(c) 神农架;(d) 迭山

Fig. 6 Distribution of LST at average elevation

in four typical regions and their surrounding regions:

(a) Funiu Mountain; (b) Taibai Mountain;

(c) Shennongjia; (d) Diego Mountain

增温效应南高北低,东西变化不显著,山体增温效应最大分布在南部的城固县,最小分布在北部的眉县。迭山及周边区域(3292 m),同海拔 LST 北高南低,西高东低,从西北向东南整体呈降低趋势。西部各县市同海拔 LST 为  $12.93^{\circ}\text{C} \sim 13.16^{\circ}\text{C}$ ,北部为  $12.39^{\circ}\text{C}$ ,南部为  $11.24^{\circ}\text{C}$ 。表明迭山及周边区域山体增温效应北高南低,西高东低,由西北向东南整体呈降低趋势,山体增温效应最大分布在西部的碌曲县,最小分布在南部的迭部县。

#### 3.2.2 典型区的地表反照率和蒸散发对增温效应的影响

分析九个影响因素与同海拔地表温度年均温的关系发现。在伏牛山及其周边区域这些影响因子与同海拔地表温度之间显著相关( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.81$ ),Alb、ET 的 VI 分别为 0.75、0.57(图 7a),该区域 Alb 对地表增温效应的影响仅次于 MBE,ET 低于 Alb 和 LAT。同海拔 LST 与 Alb、ET 呈现相反的变化趋势(图 8a)。同海拔山体增温效应最高的卢氏县,Alb 为 0.14,ET 为  $456.86 \text{ mm}$ ;山体增温效应最低的南召县 Alb 为 0.15,ET 为  $498.40 \text{ mm}$ 。在该

区域山体增温效应随 Alb 的增大逐渐减小,随 ET 的增大逐渐减小。

神农架及其周边区域这些影响因子和同海拔地表温度之间显著相关( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.72$ )。Alb、ET 的 VI 分别为 0.48、0.88(图 7b),该区域 ET 对地表增温效应的影响最大,Alb 低于 ET。Alb 和 LST 变化趋势相同,ET 和 LST 变化趋势相反(图 8b)。山体增温效应最高的巫山县,Alb 为 0.17,ET 为 522.89 mm;山体增温效应最低的神农架林区,Alb 为 0.13,ET 为 566.87mm。在该区域山体增温效应随 Alb 增大逐渐增大,随 ET 增大逐渐减小。

太白山及其周边区域这些影响因子和同海拔 LST 显著相关( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.62$ )。Alb、ET 的 VI 值分别为 0.68、0.62(图 7c),该区域 Alb 对山体增温效应的影响最大,其次为 ET。Alb 和 LST 变化趋势相同,ET 和 LST 变化趋势相反(图 8c)。山体增温效应最高的城固县,Alb 为 0.17,ET 为 397.66 mm;山体增温效应最低的眉县,Alb 为 0.13,ET 为 496.85 mm。在该区域,山体增温效应随 Alb 增大逐渐增大,随 ET 增大逐渐减小。

迭山及其周边区域,这些影响因子和同海拔 LST 显著相关( $P < 0.01$ ,  $R^2 = 0.73$ )。Alb、ET 的 VI

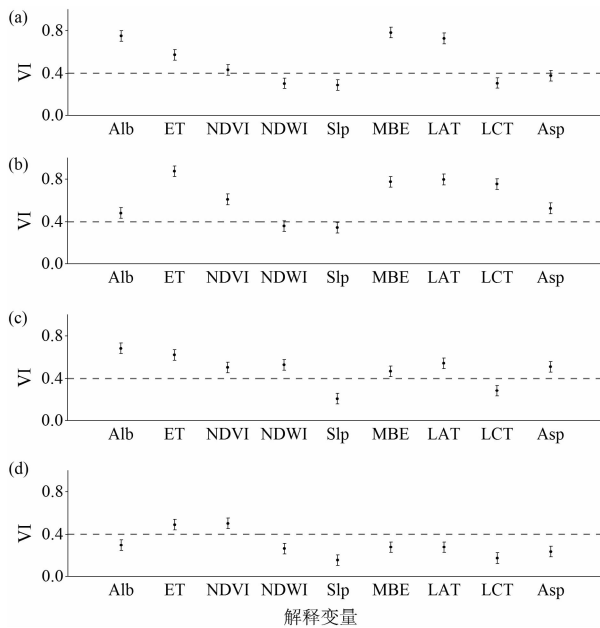


图 7 四个典型区及其周边区域解释变量重要性:

(a) 伏牛山;(b) 神农架;(c) 太白山;(d) 迭山

Fig. 7 Importance of explanatory variables in four typical regions and their surrounding regions: (a) Funiu Mountain; (b) Shennongjia; (c) Taibai Mountain; (d) Diego mountain

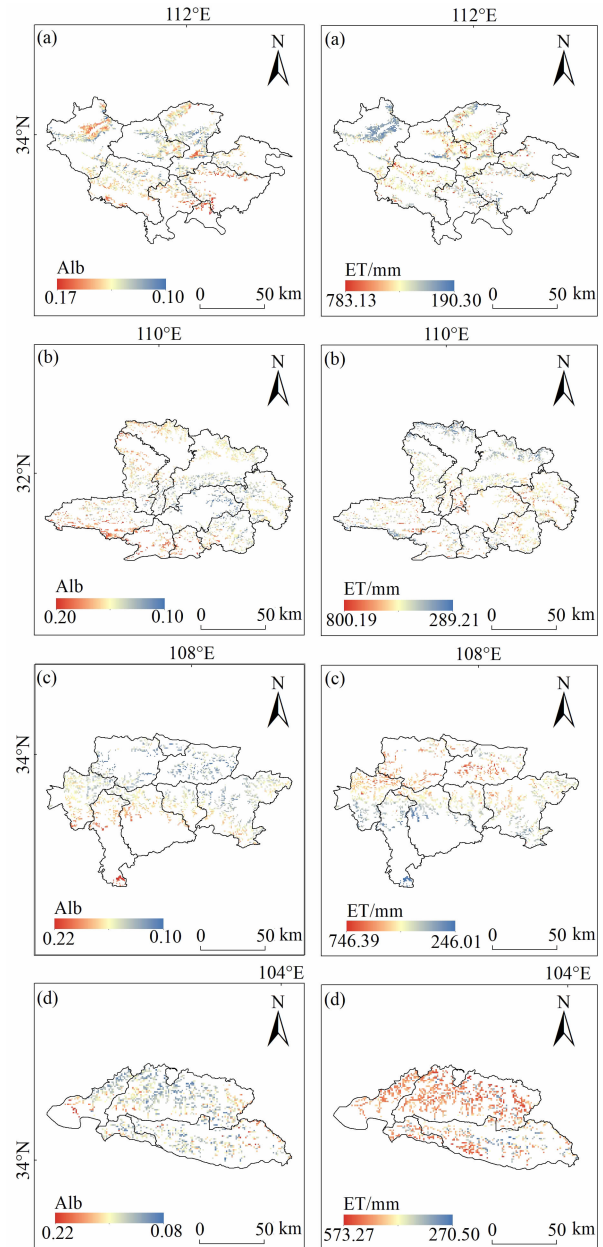


图 8 四个典型区及其周边区域 Alb 和 ET 空间分布图:

(a) 伏牛山;(b) 神农架;(c) 太白山;(d) 迭山

Fig. 8 Spatial distribution of Alb and ET in four typical regions and their surrounding regions: (a) Funiu Mountain; (b) Shennongjia; (c) Taibai Mountain; (d) Diego mountain

分别为 0.30、0.49(图 7d),该区域 Alb、ET 对山体增温的影响仅次于 NDVI。Alb、ET 和 LST 变化趋势相同(图 8d)。山体增温效应最高的碌曲县 Alb 为 0.128,ET 为 487.83 mm;山体增温效应最低的迭部县 Alb 为 0.127,ET 为 437.21 mm。在该区域山体增温效应随 Alb 增大逐渐增大,随 ET 增大逐渐增大。

### 3.3 秦巴山地及典型区的山体增温强度估算

秦巴山地山体增温效应从西向东呈现先降低后升高的趋势(图9),西北部山体增温效应最大,山体增温强度可达  $13.72^{\circ}\text{C}$ ,中北部山体增温效应最小。在四个典型区中,伏牛山及其周边区域东北部山体增温效达到最大,山体增温强度可达  $8.83^{\circ}\text{C}$ ;太白山及其周边区域山体增温效在中南部山体增温效应达到最大,山体增温强度可达  $7.65^{\circ}\text{C}$ ;神农架及其周边区域山体增温效在西南部达到最大,山体增温强度可达  $9.60^{\circ}\text{C}$ ;迭山及其周边区域山体增温在西部山体增温效达到最大,山体增温强度可达  $12.58^{\circ}\text{C}$ (图10)。在四个典型区内,迭山及其周边区域的增温效应最大,太白山及其周边区域的增温效应最小。

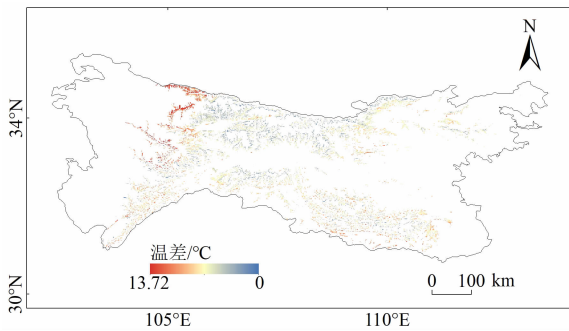


图9 秦巴山地 1500 m 处海拔 LST 温差分布图

Fig. 9 Distribution of temperature difference of LST in the Qinling-Daba Mountain at 1500 m

## 4 讨论

### 4.1 山体增温效应定量化方法

山体增温效应定量化是非地带性研究的重要突破口。以往山体增温效应定量化通常利用山体内外气象站点温度数据,结合固定的气温垂直递减率(如  $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ <sup>[21]</sup>)计算山体内外同海拔温差,或利用 MODIS 地表温度计算山体内外同海拔月均温温差或等温线变化,作为山体增温效应的量化指标<sup>[4-6, 17-18, 24]</sup>。但是复杂山区气象站点分布极不均匀,尤其是山体增温效应强烈的高山地区,几乎没有站点布置,并且山区气温垂直递减率变化复杂<sup>[21-22]</sup>,基于固定气温垂直递减率转化得到的山体内外同海拔温差估算山体增温效应存在较多的不确

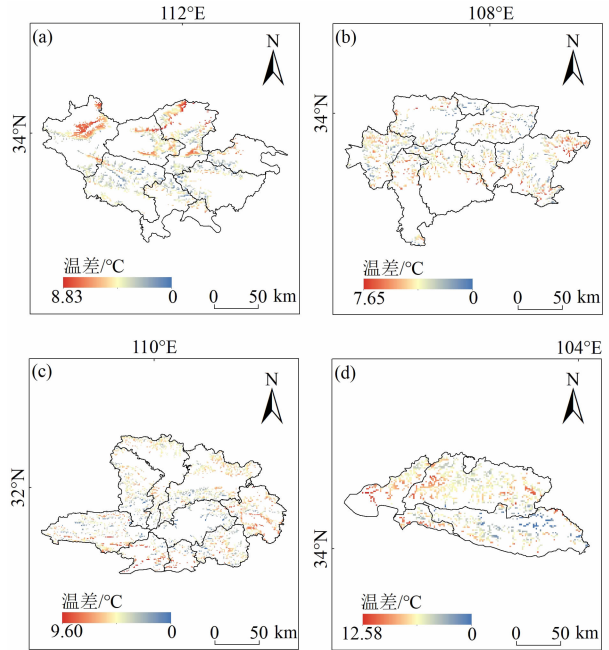


图10 四个典型区及其周边区域平均海拔处 LST

温差分布图:(a) 伏牛山;(b) 太白山;(c) 神农架;(d) 迭山

Fig. 10 Distribution of temperature difference of LST in four typical regions and their surrounding regions at the average elevation:

(a) Funiu Mountain; (b) Taibai Mountain;  
(c) Shennongjia; (d) Diego mountain

定性。

MODIS LST 数据提供了连续的地表温度变化,能够反映山区内外温度和热量的差异<sup>[52-53]</sup>。本研究选择不同区域同海拔 LST 进行对比,避免了基于固定气温垂直递减率将不同海拔气温转化为同海拔带来的误差。结果表明,基于同海拔 LST 的山体增温效应的变化与区域整体地势基本吻合。比如伏牛山地区山体增温效应的空间格局是北高南低,西部高于东部。北部的卢氏县、栾川县和嵩县等平均海拔为 937.07 m,高于南部的西峡县、内乡县南召县和镇坪县等平均海拔 582.21 m。地形地势的变化能够从机理上解释山体的增温效应<sup>[54]</sup>。另外基于遥感数据的山区地表温度栅格相比气象站点布置更均匀和连续。但是基于平均海拔进行地表温度栅格的提取也存在不同位置栅格缺失,未来需结合更多的遥感温度数据,如高层大气气压面温度建立更高精度山体增温效应分布模型,或使用已建立的随机森林模型进行缺失值的处理。

### 4.2 秦巴山地内部山体增温效应的影响因素

山体增温效应的变化与空间尺度有关,一般来

说,空间尺度越小,山体增温效应的变化越复杂,影响因素越多。全球尺度和半球尺度,山体增温效应与基面高度有关<sup>[8-9]</sup>,在山系和高原尺度,山体增温效应与降水大陆度、纬度和基面高度有关<sup>[8, 10, 15, 18]</sup>。目前还没有涉及到山系内部山体增温效应的解释。

本研究首次尝试将与地表温度相关的多个影响因素,如地表反照率、NDWI、NDVI、蒸散量、地表覆被等和山体增温效应结合,试图将山体效应的研究由宏观尺度和中观尺度向微观尺度推进。本文结果表明在伏牛山、太白山、神农架及周边地区,山体增温效应随着 ET 的增多呈现减少的趋势,说明 ET 对山体增温效应产生负面的影响。这一研究也与先前学者关于 ET 与地表温度的关系研究相吻合<sup>[55]</sup>。

本研究也表明除伏牛山及周边地区外,山体增温效应随着 Alb 的增大呈现增加趋势,说明 Alb 对山体增温效应产生正面的影响,地表反照率的增高有一定的增温效应,与 Robert<sup>[56]</sup>的研究比较吻合。西秦岭的迭山及周边区域,NDVI 对山体效应的影响超过了 ET 和 Alb,并且 NDVI 越低,山体增温效应越大,NDVI 等其他因素对于山体增温效应的影响在未来也需要进行深入研究。山体效应通过地形的变化对水热的再分配从而对山地垂直带分布产生影响,影响水热的地理要素除本文使用的坡度、坡向、基面高度,还包括山体走向、和盛行风夹角、水汽来源等<sup>[7]</sup>。未来还要考虑将各类宏观和微观地理因子和生态因子结合起来解释局部山体效应变化。

## 5 结论

本文利用 MODIS 和 DEM 数据,提取了秦巴山地及其内部四个典型区(伏牛山、太白山、神农架、迭山及其周边区域)平均海拔处地表温度,分析山体增温效应变化,并获取与地表温度变化有关的地表反照率、蒸散发等九个指标作为影响因子,采用随机森林方法分析不同影响因子与同海拔地表温度的关系,及不同区域 ET 和 Alb 对山体增温效应的影响。主要的结论如下:

(1)不同区域山体增温效应变化存在明显差异。秦巴山地山体增温效应的空间格局是西高东低,南部略高于北部;伏牛山及周边区域山体增温效应的空间格局是北高南低,西部高于东部;神农架及

周边区域是从西南向东北呈现先降低后升高趋势;太白山及周边区域是南高北低,东西变化不显著;迭山及周边区域是北高南低,西高东低,从西北向东南整体呈降低趋势。

(2)不同区域同海拔地表温度和影响因子之间存在显著相关( $P < 0.01$ ,  $R^2$  在 0.62 和 0.81 之间),Alb 对山体增温效应的影响在不同区域存在差异。太白山及周边区域 Alb 影响最大,VI 值达到 0.68;伏牛山及周边区域,Alb 影响仅次于 MBE,VI 值达到 0.75。在伏牛山及周边区域随着 Alb 增高,山体增温效应呈减小趋势。除伏牛山及周边区域外,其他三个典型区 Alb 和山体增温效应的趋势保持一致,说明地表反照率越高,山体增温效应越大。

(3)ET 对山体增温效应的影响在不同区域存在差异。神农架及周边区域,ET 对同海拔 LST 的影响最大,VI 值达到了 0.88;在迭山及周边区域,ET 影响仅次于 NDVI,VI 值达到 0.49;在太白山及周边区域,ET 影响仅次于 Alb,VI 值达到 0.62。除迭山外,其他三个典型区 ET 越高,山体增温效应越小。

## 参考文献 (References)

- [1] QUERVAIN A D. Die Hebung der atmosphärischen Isothermen in der Schweizer Alpen und ihre Beziehung zu deren Höhengrenzen [J]. Gerlands Beitr Geophys, 1904, 6:481-533.
- [2] YAO Yonghui, ZHANG Baiping. The mass elevation effect of the Tibetan Plateau and its implications for Alpine treelines [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(8):1833-1846. DOI: 10.1002/joc.4123
- [3] 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[J]. 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 [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(1):95-107] DOI: 10.11821/xb201301011
- [4] 刘俊杰,潘自武,秦奋,等. 基于 MODIS 的秦巴山地气温估算与山体效应分析[J]. 地理研究, 2020, 39(3):735-748. [LIU Junjie, PAN Ziwu, QIN Fen, et al. Estimation of air temperature based on MODIS and analysis of mass elevation effect in the Qinling-Daba Mountains [J]. Geographical Research, 2020, 39(3):735-748] DOI: 10.11821/dlyj020190164
- [5] ZHANG Baiping, YAO Yonghui. Implications of mass elevation effect for the altitudinal patterns of global ecology [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(7):871-877. DOI: 10.1007/s11442-016-1303-2
- [6] 姚永慧,徐美,张百平. 青藏高原增温效应对垂直带谱的影响[J]. 地理学报, 2015, 70(3):407-419. [YAO Yonghui, XU



- Mei, ZHANG Baiping. Implication of the heating effect of the Tibetan Plateau for mountain altitudinal belts [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(3): 407–419. DOI: 10.11821/dlxb201503005
- [7] 张百平, 姚永慧, 赵芳, 等. 山体效应研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2015. [ZHANG Baiping, YAO Yonghui, ZHAO Fang, et al. Study of mountain mass effect [M]. Beijing: China Environment Press, 2015]
- [8] ZHAO Fang, ZHANG Baiping, ZHANG Shuo, et al. Contribution of mass elevation effect to the altitudinal distribution of global treelines [J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, **12**(2): 289–297. DOI: 10.1007/s11629-014-3223-x
- [9] ZHAO Fang, ZHANG Baiping, PANG Yu, et al. A study of the contribution of mass elevation effect to the altitudinal distribution of timberline in the Northern Hemisphere [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, **24**(2): 226–236. DOI: 10.1007/s11442-014-1084-4
- [10] HAN Fang, YAO Yonghui, DAI Shibao, et al. Mass elevation effect and its forcing on timberline altitude [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, **22**(4): 609–616. DOI: 10.1007/s11442-012-0950-1
- [11] GRUBB J P. Interpretation of massenerhebung effect on tropical mountains [J]. *Nature*, 1971, **229**: 44–45. DOI: 10.1038/229044a0
- [12] BARRY R G. Mountain weather and climate [M]. New York: Cambridge University Press, 2008.
- [13] LEUSCHNER C. Timberline and alpine vegetation on the tropical and warm-temperate oceanic islands of the world: Elevation, structure and floristics [J]. *Vegetatio*, 1996, **123**(2): 193–206. DOI: 10.1007/BF00118271
- [14] FLENLEY J. Ultraviolet insolation and the tropical rainforest: Altitudinal variations, quaternary and recent change, extinctions, and biodiversity [M]. Chichester: Praxis, 2007.
- [15] 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[J]. *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 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(11): 1556–1564] DOI: 10.11821/dlxb201211012
- [16] 韩芳, 张百平, 谭靖, 等. 山体基面高度对青藏高原及其周边地区雪线空间分布的影响[J]. *地理研究*, 2014, **33**(1): 23–30. [HAN Fang, ZHANG Baiping, TAN Jing, et al. The effect of mountain basal elevation on the distribution of snowline with different mountain basal elevations in Tibetan Plateau and its surrounding areas [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **33**(1): 23–30] DOI: 10.11821/dlyj201401003
- [17] HE Wenhui, ZHANG Baiping, ZHAO Fang, et al. The mass elevation effect of the Central Andes and its implications for the Southern Hemisphere's highest treeline [J]. *Mountain Research and Development*, 2016, **36**(2): 213–221. DOI: 10.165/MRD-JOURNAL-D-15-00027
- [18] 王婧, 张百平, 张文杰, 等. 科罗拉多落基山脉山体效应量化研究[J]. *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 [J]. *Geographical Research*, 2017, **36**(8): 1467–1477] DOI: 10.11821/dlyj201708006
- [19] 索南东主, 姚永慧, 张百平. 青藏高原和阿尔卑斯山山体效应的对比研究[J]. *地理研究*, 2020, **39**(11): 2568–2580. [SUO Nandongzhu, YAO Yonghui, ZHANG Baiping. Comparative study on the mountain elevation effect of the Tibetan Plateau and the Alps [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(11): 2568–2580] DOI: 10.11821/dlyj020190755
- [20] BARRY R G. Mountain weather and climate [M]. London and New York: Routledge, 1992.
- [21] 翟丹平, 白红英, 冯海鹏, 等. 基于气象数据和遥感影像的太白山气温直减率[J]. *山地学报*, 2016, **34**(4): 496–503. [ZHAI Danping, BAI Hongying, FENG Haipeng, et al. Temperature lapse rates in the Taibai Mountain based on meteorological data and remote sensing image [J]. *Mountain Research*, 2016, **34**(4): 496–503] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000155
- [22] TANG Zhiyao, FANG Jingyun. Temperature variation along the northern and southern slopes of Mt. Taibai, China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **139**(3): 200–207. DOI: 10.1016/j.agrformet.2006.07.001
- [23] 张朔, 姚永慧, 庞宇, 等. 山体基面高度的提取方法——以台湾岛为例[J]. *地球信息科学学报*, 2012, **14**(5): 562–568. [ZHANG Shuo, YAO Yonghui, PANG Yu, et al. Mountain basal elevation extraction in the Taiwan island [J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2012, **14**(5): 562–568] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00562
- [24] ZHANG Shuo, ZHANG Baiping, YAO Yonghui, et al. Magnitude and forming factors of mass elevation effect on Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Chinese Geographical Science*, 2016, **26**(6): 745–754. DOI: 10.1007/s11769-016-0834-x
- [25] GE Jun, GUO Weidong, PITMAN A J, et al. The non-radiative effect dominates local surface temperature change caused by afforestation in China [J]. *Journal of Climate*, 2019, **32**(14). DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0772.1
- [26] 孙菽芬. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型[M]. 北京: 气象出版社, 2005. [SUN Shufen. Physical and biochemical mechanisms and parametric models of land surface processes [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005]
- [27] SCHULTZ N M, LAWRENCE P J, LEE Xuhui. Global satellite data highlights the diurnal asymmetry of the surface temperature

- response to deforestation [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, **122** (4): 903 – 917. DOI: 10.1002/2016JG003653
- [28] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. *Science*, 2006, **313** (5790): 1068 – 1072. DOI: 10.1126/science.1128845
- [29] RORISON I H, SUTTON F, HUNT R. Local climate, topography and plant growth in Lathkill Dale NNR. I. A twelve-year summary of solar radiation and temperature [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1986, **9** (1): 49 – 56. DOI: 10.1111/1365 – 3040.ep11612961
- [30] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982 – 2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析 [J]. *地理学报*, 2019, **74** (3): 534 – 543. [GAO Jiangbo, JIAO Kewei, WU Shaohong. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982 – 2013 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74** (3): 534 – 543] DOI: 10.11821/dlxb201903010
- [31] 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. [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]
- [32] 杜习乐, 吕昌河, 王海荣. 土地利用/覆被变化 (LUCC) 的环境效应研究进展 [J]. *土壤*, 2011, **43** (3): 350 – 360. [DU Xile, LYU Changhe, WANG Hairong. Review: Researches on environmental effects of land use/cover change [J]. *Soils*. 2011, **43** (3): 350 – 360] DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2011.03.009
- [33] ESWAR R, SEKHAR M, BHATTACHARYA B K. Disaggregation of LST over India: Comparative analysis of different vegetation indices [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, **37** (5): 1035 – 1054. DOI: 10.1080/01431161.2016.1145363
- [34] YEH T C, CHANG C C. A preliminary experimental simulation on heating effect of Tibetan Plateau on the general circulation over Eastern Asia in summer [J]. *Scientia Sinica*, 1974, **17** (3): 397 – 420.
- [35] CHEN Longxun, REITE E R, FENG Zhiqiang. The atmospheric heat source over the Tibetan Plateau: May – August 1979 [J]. *Monthly Weather Review*, 1985, **113** (10): 1771 – 1790. DOI: 10.1175/1520 – 0493(1985)113 <1771:TAHSOT>2.0.CO;2
- [36] SHREVE F. Conditions indirectly affecting vertical distribution on desert mountains [J]. *Ecology*, 1922, **3** (4): 269 – 274. DOI: 10.2307/1929428
- [37] 傅抱璞. 山地气候 [M]. 北京: 科学出版社, 1983. [FU Baopu. *Mountain climate* [M]. Beijing: Science Press, 1983]
- [38] 刘俊杰, 秦奋, 赵芳, 等. 秦巴山地山体基面高度的提取及分布 [J]. *地球信息科学学报*, 2018, **20** (10): 1457 – 1466. [LIU Junjie, QIN Fen, ZHAO Fang, et al. Extraction and distribution of mountain base elevation in the Qinling – Daba Mountains [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, **20** (10): 1457 – 1466] DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180227
- [39] VUKOVICH F M, TOLL D L, MURPHY R E. Surface temperature and albedo relationships in Senegal derived from NOAA-7 satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, **22** (3): 413 – 421. DOI: 10.1016/0034 – 4257 (87) 90092 – 7
- [40] 杨金忠, 蔡树英. 土壤中水、汽、热运动的耦合模型和蒸发模拟 [J]. *武汉水利电力学院学报*, 1989, **22** (4): 35 – 44. [YANG Jinzhong, CAI Shuying. A coupled model of water-vapor-heat transport in porous media and simulation analysis of evaporation [J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 1989, **22** (4): 35 – 44]
- [41] LIANG Shunlin. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **76**: 213 – 238. DOI: 10.1016/S0034 – 4257 (00) 00205 – 4
- [42] XU Tongren, BATENI S M, MARGULIS S A, et al. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and canopy transpiration via a two-source variational data assimilation system [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, **17**: 2353 – 2370. DOI: 10.1175/JHM – D – 15 – 0178.1
- [43] BREIMAN L. Random forests-random features [J]. *Machine Learning*, 1999: 1 – 29. DOI: 10.1023/A:1010933404324
- [44] 宋述芳, 何入洋. 基于随机森林的重要性测度指标体系 [J]. *国防科技大学学报*, 2021, **43** (2): 25 – 32. [SONG Shufang, HE Ruyang. Importance measure index system based on random forest [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, **43** (2): 25 – 32] DOI: 10.11887/j.cn.202102004
- [45] 邢立亭, 李净, 焦文慧. 基于 MODIS 和随机森林的兰州市日最高气温和最低气温估算 [J]. *干旱区研究*, 2020, **37** (3): 152 – 158. [XING Liting, LI Jing, JIAO Wenhui. Estimation of daily maximum and minimum temperature of Lanzhou city based on MODIS and random forest [J]. *Arid Zone Research*, 2020, **37** (3): 152 – 158] DOI: 10.13866/j.azr.2020.03.17
- [46] 华俊玮, 祝善友, 张桂欣. 基于随机森林算法的地表温度降尺度研究 [J]. *国土资源遥感*, 2018, **30** (1): 78 – 86. [HUA Junwei, ZHU Shanyou, ZHANG Guixin. Downscaling land surface temperature based on random forest algorithm [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, **30** (1): 78 – 86] DOI: 10.6046/gtzyyg.2018.01.11
- [47] ZHAO Wei, DUAN Sibao, LI Ainong, et al. A practical method for reducing terrain effect on land surface temperature using random forest regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **221**: 635 – 649. DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.008
- [48] MATTHEW W M. Bias of the random forest Out-of-Bag (OOB)

- error for certain input parameters [J]. *Open Journal of Statistics*, 2011, **1**(3): 205 – 211. DOI: 10.4236/ojs.2011.13024
- [49] ARCHER K J, KIMES R V. Empirical characterization of random forest variable importance measures [J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2008, **52**(4): 2249 – 2260. DOI: 10.1016/j.csda.2007.08.015
- [50] NICODEMUS K K. Letter to the editor: On the stability and ranking of predictors from random forest variable importance measures [J]. *Briefings in Bioinformatics*, 2011, **12**(4): 369 – 373. DOI: 10.1093/bib/bbr016
- [51] STROBL C, BOULESTEIX A L, ZEILEIS A, et al. Bias in random forest variable importance measures: Illustrations, sources and a solution [J]. *BMC Bioinformatics*, 2007, **8**:25. DOI: 10.1186/1471-2105-8-25
- [52] 于文凭, 马明国. MODIS 地表温度产品的验证研究—以黑河流域为例[J]. *遥感技术与应用*, 2011, **26**(6):705 – 712. [YU Wenping, MA Mingguo. Validation of the MODIS land surface temperature products – a case study of the Heihe River Basin [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, **26**(6): 705 – 712] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2011.6.705
- [53] 韩芳, 张百平, 李西灿, 等. 青藏高原山体效应的遥感估算及其生态效应分析[J]. *山地学报*, 2016, **34**(6): 788 – 798. [HAN Fang, ZHANG Baiping, LI Xican, et al. MODIS-based estimation of mass elevation effect in the Tibetan Plateau and its ecological effect [J]. *Mountain Research*, 2016, **34**(6): 788 – 798] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000187
- [54] HOLTMEIER F K. *Mountain timberlines ecology, patchiness, and dynamics* (2nd ed.) [M]. New York: Springer Verlag, 2009: 49 – 58.
- [55] 王欢欢, 赵杰, 岳超, 等. 黄土高原植被恢复对地表的冷却作用及变化规律[J]. *水土保持学报*, 2021, **35**(3): 214 – 220. [WANG Huanhuan, ZHAO Jie, YUE Chao, et al. Cooling effect induced by afforestation on the Loess Plateau and its change law [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(3): 214 – 220] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.03.030
- [56] DICKINSON R E, KENNEDY P. Impacts on regional climate of Amazon deforestation [J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, **19**(19):1947 – 1950. DOI: 10.1029/92GL01905

## Influence of Albedo and Evapotranspiration on the Mass Elevation Effect in the Qinling-Daba Mountains of China

LI Wuyang<sup>1</sup>, LAN Xincan<sup>1</sup>, TANG Jiale<sup>1</sup>, ZHAO Fang<sup>1, 2\*</sup>, LIAN Yuanyuan<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China;

2. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Kaifeng 475004, Henan, China)

**Abstract:** Mass Elevation Effect (MEE) play a significant role in causing higher temperatures inside mountains than ones outside mountains and it was quantified and widely used to interpret the distribution of mountain altitudinal belt. Heat exchange between ground and air is considered as the mechanism of MEE. However it is still unclear which surface factors associated with heat exchange between ground and air should be responsible for MEE. This paper aims at exploring the variation of MEE and exploring the geographical mechanism based on the key surface parameters of the land-air heat exchange process in the Qingling-Daba Mountains of China. MODIS and DEM data were collected to extract land surface temperatures (LST) at same altitude as dependent variable; Albedo (Alb), evapotranspiration (ET), NDVI, NDWI and other factors were analyzed and used as independent variables in the Qingling-Daba Mountains and the typical areas (the Funiu Mountains, the Taibai Mountains, the Shennongjia Mountains, the Diego Mountain); Random forest method was used to analyze the influence of independent variables on dependent variables.

The results showed that: (1) There was a close correlation between LST at the same altitude and the selected influence factors with  $R^2$  being all above 0.66 in the typical areas to be selected. (2) The variation of Alb and MEE showed a consistency in the trends meaning a positive effect of the former on the latter except the Funiu

Mountain. The greatest effect of Alb on MEE was found in the Taibai Mountain and its surrounding areas with VI value as high as 0.68. (3) In addition to the Diego Nountain, an opposite trend was found between the variation of ET and MEE in different areas, which means the higher the ET, the smaller the MEE. The greatest effect of ET on MEE was found in the Shennongjia Mountain and its surrounding areas, with VI value as high as 0.88. The effect of ET on MEE was second only to the effect of Alb in the Taibai Mountain and its surrounding areas. The innovation of this study is to use LST data at same altitude as a proxy factor for MEE and the influence of Alb and ET on MEE were explored in the Qinling-Daba Mountains and the interior typical areas. By this study, it broke through the dependence of the study of MEE on altitudinal belt at macro scale (continental scale and global scale) and the distribution of meteorological stations at regional scale, and it provides a possibility for the study of the mechanism of MEE from macro to micro.

**Key words:** mountain heating effect; random forest; land surface temperature; evapotranspiration; albedo; the Qingling-Daba Mountains