

文章编号: 1008-2786-(2019)6-818-10
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000472

金佛山西坡气温的垂直变化特征

周礼华¹, 黄 力¹, 钱深华¹, 李 莉^{2*}, 杨永川¹

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400030)

摘 要: 山地气温的实测数据是相关学科极其重要的基础资料, 其垂直变化特征是研究山地气温的重要内容之一。本研究使用 HOBO Onset 自动温度记录仪于 2017 年 6 月—2018 年 6 月对重庆金佛山西坡 14 个海拔高度的气温进行 30 min 间隔的连续监测, 分析了金佛山西坡气温的时序差异和垂直变化规律。结果如下: (1) 金佛山西坡年平均气温直减率为 0.53 °C/100 m, 气温直减率的月份间差异较小; (2) 平均最高气温、平均最低气温及年平均气温随海拔升高而线性降低, 极端高温沿海拔梯度的变化不明显; (3) 月平均日较差随海拔升高呈二次曲线变化; (4) 日平均气温 ≥ 0 °C、 ≥ 5 °C 和 ≥ 10 °C 的积温随海拔升高而降低, 积温递减率几乎相同 (约 184.2 °C/100 m), 相应积温持续天数随海拔升高以平均 5 d/100 m 的速率递减; (5) 各监测点实测气温较气温地理分布模型求得的气温值偏小, 而较基于 WorldClim 数据库所得的插值气温整体偏大。

关键词: 垂直变化; 气温直减率; 金佛山; 重庆

中图分类号: P423.3

文献标志码: A

山地气候的垂直变化是植被、土壤和地形地貌等因素综合作用的体现, 同时影响着土壤发育和植被生长^[1-2, 6]。气温是指示气候变化的关键指标^[3-5], 其数据的准确获取对于深入分析山地气候的垂直变化特征^[6-9]和山地垂直植被带对气候变化的响应规律等具有重要意义^[10-12]。但由于特殊地形的阻隔, 山地气象站分布不足, 目前多数研究中山地气温数据的获取主要基于有限的气象站资料, 通过空间插值^[20, 41]、DEM 空间模拟^[15-17]或模型推算^[18-19]等方法得到。这些方法所获取的数据具有较大的局限, 不能真实地反映小尺度上山地气温的特征。因此, 为准确地获取山地气温垂直变化信息需要大量的实地监测。

目前, 山地气温垂直变化的研究主要集中在青

藏高原^[14, 21-22], 中北部的秦岭^[13, 16]、祁连山^[23]、长白山^[9]以及东南部的南岭^[24]、武夷山^[6]、天目山^[25]和莽山^[26]等山脉。西南山地是世界生物多样性的热点地区之一^[27], 针对该地区山地气温垂直变化规律的研究十分缺乏。金佛山是西南山地的典型代表、大娄山系的主峰, 具有丰富的喀斯特梯形台地, 针对其不同海拔气象要素的长期定位监测一直处于空白。此外, 在特殊地形的影响下, 金佛山的垂直气温具有怎样的变化规律, 目前我们的认识还十分不足。本研究基于金佛山西坡 14 个 HOBO 温湿度自动监测站点 2017 年 6 月—2018 年 6 月的实测气象资料, 分析了金佛山西坡气温沿海拔梯度的变化特征, 同时对比了相同站点气温实测、模型估算值和空间插值之间的差异, 可为金佛山垂直植被带的深入

收稿日期 (Received date): 2019-04-27; 改回日期 (Accepted date): 2019-12-10

基金项目 (Foundation item): 重庆市自然科学基金项目 (CSTC2016jcyjA0379)。[Natural Science Foundation of Chongqing, China (CSTC2016jcyjA0379)]

作者简介 (Biography): 周礼华 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 植被生态学。[ZHOU Lihua (1992-), male, M. Sc. candidate, research on vegetation ecology] E-mail: lhzhou1023@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 李莉 (1971-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 园林植物与生态。[LI Li (1971-), female, M. Sc., lecturer, research on garden plants and ecology] E-mail: lily7014@126.com

研究和分析提供可靠的依据,并为山地气候垂直变化规律的大尺度研究提供基础数据。

1 研究区概况

研究区位于重庆市南川区金佛山国家级自然保护区内(29°01′~29°03′N,107°08′~107°12′E)。金佛山属于云贵高原向四川盆地的过渡带,是大娄山脉延伸至四川盆地东南部的突异山峰,其地形地貌兼具四川盆地与云贵高原的特点^[30,41]。最高海拔2238 m,海拔高差约1600 m。金佛山属于亚热带湿润季风气候,四季分明,温和多雨。土壤类型主要为黄壤、黄棕壤、石灰土及少量亚高山草甸土^[29]。植被主要有亚热带常绿阔叶林、常绿阔叶与落叶阔叶混交林、山地矮林、针叶林、灌丛和草甸等类型^[28,41]。同时,金佛山是银杉(*Cathaya argyrophylla*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、珙桐(*Davidia involucrata*)等孑遗植物在第四纪冰期的避难所之一^[30]。

2 数据收集与方法

于2017年6月初从金佛山西坡山底的碧潭幽谷(海拔800 m)到山顶观景台(海拔2100 m),按100 m的海拔梯度安装了14个HOBO温湿度自动观测仪(HOBO Pro v2 Temp/RH Logger onset computer corporation, Pocasset, USA),温湿度自动观测仪放置于百叶箱中,安装在相对开阔的树干上,

距离地面1.5 m左右,并用GPS Map 62S记录安装点位置信息。2017年6月1日08时至2018年6月1日08时,每30 min记录一次气温、空气相对湿度,并自动贮存,共记录获得14个监测点1年的气象数据。

根据所得气温监测数据,计算逐日气温、月平均气温(平均值、最大值、最小值)、日较差和年较差以及气温直减率 $\gamma(^{\circ}\text{C} \cdot 100 \text{ m}^{-1})$ ^[31],即:

$$\gamma = \frac{T_i - T_0}{H_i - H_0} \quad (1)$$

式中, T_i 、 T_0 分别为海拔 H_i 与 H_0 点对应平均气温($^{\circ}\text{C}$)。

根据月平均温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 计算出温暖指数 $WI(^{\circ}\text{C} \cdot \text{月})$ 和寒冷指数 $CI(^{\circ}\text{C} \cdot \text{月})$ ^[32-33],计算公式如下:

$$WI = \sum (T_j - 5) \quad (2)$$

$$CI = - \sum (5 - T_i) \quad (3)$$

式中, T_j 为月平均温度大于5 $^{\circ}\text{C}$ 的温度; T_i 为月平均温度小于5 $^{\circ}\text{C}$ 的温度。

全球公共气候数据库(WorldClim; <http://www.worldclim.org/>)是温度数据的重要来源之一,在目前区域尺度的气温研究中此数据库被广泛采用。本研究从该数据库下载精度为2.5 arc min的气温栅格数据,基于各监测点经纬度信息,利用R语言提取对应监测点年平均气温插值 T_c 。根据监测点位置信息和气温的地理分布模型 T_m ^[18],推算相应监测点年平均气温 T_m 。对比了气温空间插值,模

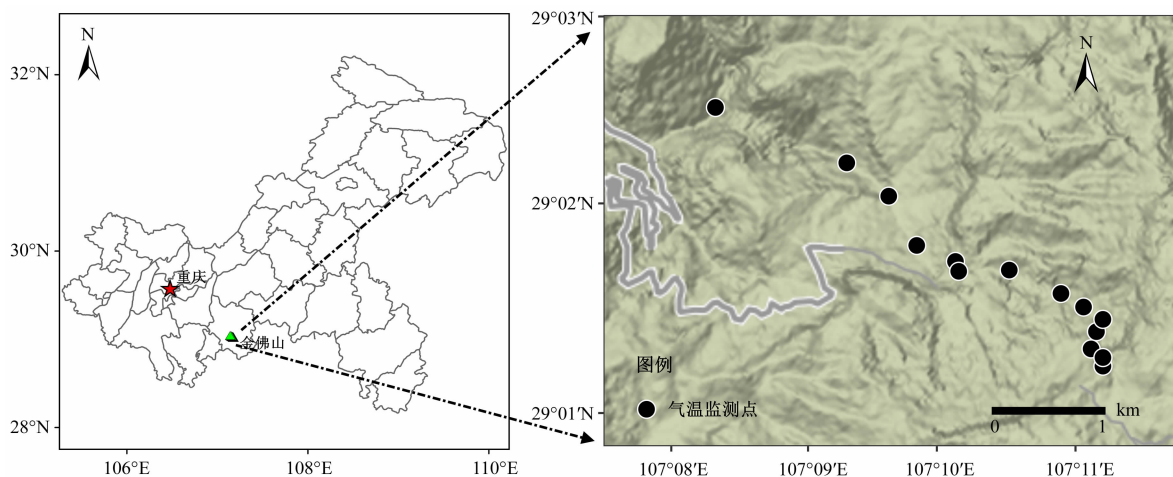


图1 研究地点位置图

Fig.1 Location map of study sites

型推算值与实测值间的差异,差异大小用所得气温值与实测值之差 ΔT 表示。

$$T_m = a_0 + a_1\varphi + a_2\lambda + a_3H \tag{4}$$

式中, φ 、 λ 和 H 分别为经度、纬度和海拔高度(m); a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为系数。

3 结果与分析

3.1 平均气温和气温直减率

由表1可以看出,金佛山西坡平均气温随海拔高度升高而降低。年平均气温从海拔800 m的15.50℃逐渐下降到海拔2100 m的8.73℃。1月平均气温最低,从海拔800 m的4.97℃下降到2100 m的-2.19℃。7月平均气温最高,从海拔800 m的25.40℃下降到2100 m的18.80℃。年平均气温和各个月份平均气温随海拔升高逐渐降低,逆温现象不明显。除1月份海拔 ≥ 1600 m和2月份海拔 ≥ 1900 m的观测点外,其余观测点各月平均气温均大于0℃。

年平均气温直减率为0.53℃/100 m,9月、10月平均气温直减率最小,为0.48℃/100 m,7月平均气温直减率最大,为0.61℃/100 m。不同季节间平均气温直减率差异不明显,夏季(6月—8月)平均气温直减率最大,为0.55℃/100 m,秋季(9月—11月)最小,为0.50℃/100 m(表1)。

3.2 极端温度

由表2可知,极端低温随海拔上升而下降,从海拔800 m的-0.68℃下降到海拔2100 m的-9.64℃。极端低温均出现在1月份,海拔1100~1400 m的所有监测点在1月27日出现,其余监测点在1月9日出现。极端高温随海拔高度的变化规律较弱,海拔最低点(800 m)极端高温为35.58℃,海拔最高点(2100 m)极端高温为31.08℃。极端高温最大值出现在海拔1100 m,为48.60℃。各海拔高度的极端高温均出现在7月,海拔1400 m及以上所有监测点的极端高温出现同一天,海拔1400 m以下的监测点极端高温出现日期不同。

表1 金佛山西坡不同海拔高度的月平均气温和年平均气温(℃)

Tab.1 Monthly average temperature and annual average temperature at different altitudes on the west slope of Mt. Jinfo (℃)

海拔/m	冬季			春季			夏季			秋季			年均 气温
	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	
2100	0.31	-2.19	-1.35	5.97	9.52	12.59	14.63	18.80	17.32	14.63	9.72	4.79	8.73
2000	0.72	-1.79	-0.89	6.57	10.28	13.24	15.35	19.40	18.05	14.96	10.12	5.17	9.27
1900	1.44	-1.20	-0.14	7.52	11.48	14.02	16.19	20.55	19.12	15.71	10.65	5.95	10.11
1800	2.24	-0.46	0.66	8.36	12.23	14.66	16.75	21.44	19.93	16.45	11.36	6.69	10.86
1700	2.21	-0.58	0.82	8.29	12.10	14.62	16.48	21.22	19.77	16.43	11.37	6.68	10.78
1600	2.80	-0.08	1.44	9.04	12.90	15.41	17.26	22.20	20.62	17.19	12.10	7.33	11.52
1500	3.03	0.26	1.86	9.35	13.21	15.60	17.39	22.58	20.94	17.38	12.41	7.69	11.81
1400	3.26	0.71	2.43	10.03	14.04	16.29	18.14	23.38	21.63	17.99	12.85	8.05	12.40
1300	4.58	1.72	3.37	11.18	15.38	17.51	19.76	25.30	23.51	18.95	13.80	9.30	13.70
1200	4.64	2.18	3.83	11.25	15.21	17.51	19.52	25.15	23.30	18.93	14.00	9.46	13.75
1100	5.00	2.80	4.49	11.81	15.72	17.88	19.93	25.64	23.22	19.25	14.36	9.93	14.17
1000	5.63	3.43	5.03	12.24	16.32	18.59	20.77	26.53	24.06	20.00	14.95	10.54	14.84
900	6.03	4.10	5.61	12.55	16.72	19.06	21.28	26.66	24.50	20.46	15.42	11.05	15.29
800	6.70	4.97	6.44	12.84	16.80	19.10	21.22	25.40	24.14	20.83	15.92	11.64	15.50
平均气温	3.47	0.99	2.40	9.79	13.71	16.15	18.19	23.16	21.44	17.80	12.79	8.16	12.34
直减率 /(℃·100 m ⁻¹)	0.49	0.55	0.60	0.53	0.56	0.50	0.51	0.61	0.55	0.48	0.48	0.53	0.53

表 2 金佛山西坡极端温度随海拔变化情况

Tab.2 Extreme temperatures at different altitudes
on the west slope of Mt. Jinfo

海拔/m	极端低温		极端高温	
	日期	温度/℃	日期	温度/℃
2100	1 月 09 日	-9.64	7 月 24 日	31.08
2000	1 月 09 日	-9.13	7 月 24 日	31.23
1900	1 月 09 日	-8.40	7 月 24 日	30.27
1800	1 月 09 日	-7.54	7 月 24 日	30.42
1700	1 月 09 日	-6.99	7 月 24 日	30.50
1600	1 月 09 日	-6.07	7 月 24 日	30.65
1500	1 月 09 日	-5.61	7 月 24 日	31.00
1400	1 月 27 日	-5.14	7 月 24 日	31.36
1300	1 月 27 日	-4.41	7 月 27 日	33.16
1200	1 月 27 日	-3.87	7 月 27 日	31.82
1100	1 月 27 日	-3.15	7 月 24 日	48.60
1000	1 月 09 日	-2.28	7 月 24 日	46.87
900	1 月 09 日	-1.76	7 月 28 日	34.65
800	1 月 09 日	-0.68	7 月 20 日	35.58

3.3 月平均最高气温和最低气温

月平均最高气温、最低气温与年平均气温均随海拔升高而降低,线性关系拟合较好 ($T_{\text{最高均温}} = -0.0064x + 24.19, R^2 = 0.9910; T_{\text{年均温}} = -0.0053x + 20.045, R^2 = 0.9881; T_{\text{最低均温}} = -0.0048x + 17.16, R^2 = 0.9779$),最大值和最小值均分别出现在低海拔 800 m 和高海拔 2100 m (图 2)。

3.4 气温日较差

金佛山西坡年平均日较差随海拔升高呈非线性变化,二次方程拟合效果最佳($T_{\text{全年}} = 1.70 \times 10^{-6}x^2 - 0.00658x + 10.31; R^2 = 0.9745$),海拔 800 m 处出现最大值 6.04 ℃,在海拔约 1800 m 出现最小值 3.68 ℃ (图 3)。1 月和 7 月平均日较差变化趋势相似,随海拔升高呈二次曲线下降,均在海拔 800 m 出现最大值,分别为 3.59 ℃、8.68 ℃。1 月平均日较差在海拔 1500 m 出现最小值为 2.59 ℃,7 月平均日较差在海拔 1800 m 出现最小值为 4.09 ℃。气温年较差随海拔高度呈非线性关系,二次方程拟合较好 ($T = -3.77 \times 10^{-6}x^2 + 0.0102x + 15.59; R^2 = 0.6667$) (图 4)。气温年较差在海拔 1300 m 处出现最大值 23.13 ℃,在海拔 800 m 出现最小值 20.31 ℃。

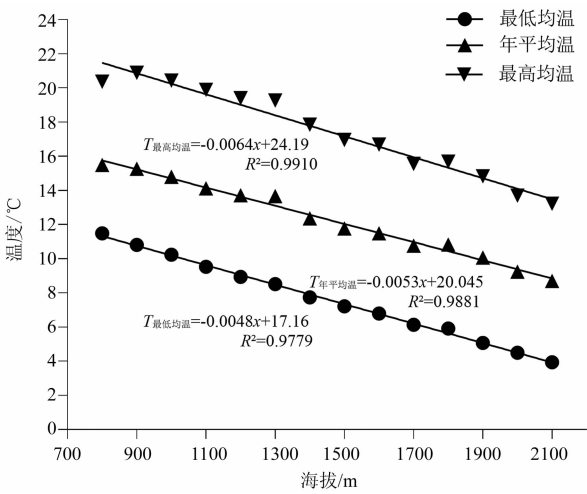


图 2 金佛山西坡平均最高气温、平均最低气温和年平均气温随海拔的变化关系

Fig.2 Variation in the average maximum temperature, the average minimum temperature, and the annual average along altitudinal gradient on the west slope of Mt. Jinfo

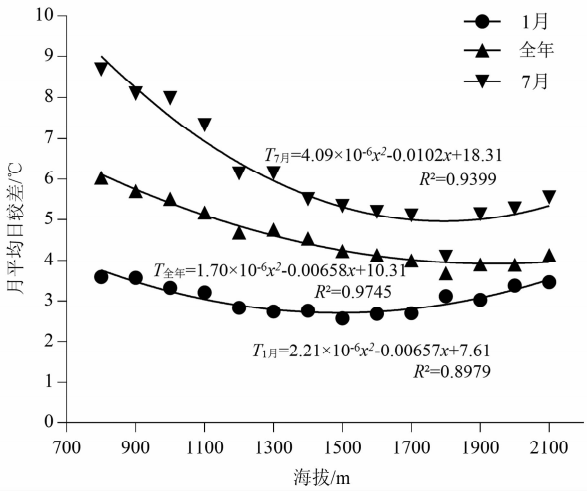


图 3 金佛山西坡气温月平均日较差随海拔高度的变化

Fig.3 Variation in month diurnal range of temperature along altitudinal gradient on the west slope of Mt. Jinfo

3.5 积温、寒冷指数和温暖指数

金佛山西坡日平均气温 ≥ 0 ℃、 ≥ 5 ℃ 和 ≥ 10 ℃ 的积温值与海拔均呈明显的线性负相关 (图 4)。三个界限温度的积温递减率几乎相同,约 184.2 ℃/100 m。从海拔 800 m 到高海拔 2100 m,3 个积温的差值十分接近,约 2300 ℃ (表 3)。日平均气温 ≥ 10 ℃ 的积温常被用作植物生长的有效积温^[34], ≥ 10 ℃ 的积温从海拔 800 m 的 5042.56 ℃ 降低到海拔 2100 m 的 2703.21 ℃。此外,在时间上,日平均气温 ≥ 0 ℃ 与 ≥ 5 ℃ 积温的起始时间提前约

1 个月,而终止时间推后约 1 个月,日平均气温 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的起始时间相比也同样提前约 1 个月,终止时间推后约 1 个月。因此,随海拔上升, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的稳定持续时间各相差约 2 个月,即海拔每升高 100 m,积温持续天数约减少 5 d。

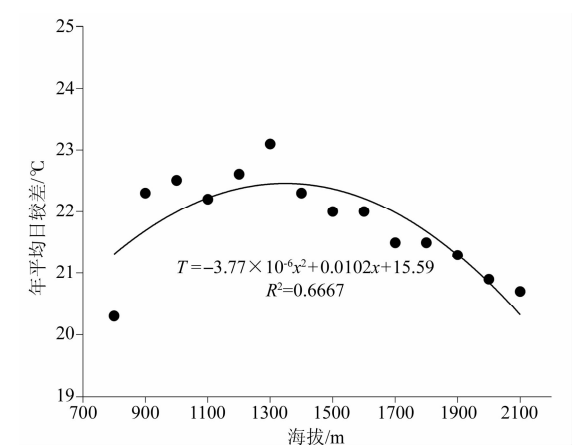


图 4 金佛山西坡气温年平均日较差随海拔高度的变化

Fig.4 Variation in annual range of temperature along altitudinal gradient on the west slope of Mt. Jinfo

从表 3 还可以看出,温暖指数 (WI) 和寒冷指数 (CI) 均随海拔升高呈明显的下降趋势。温暖指数以 $4.49\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}/100\text{ m}$ 的递减率从海拔 800 m 的 $125.71\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}$ 降低到海拔 2100 m 的 $62.77\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}$ 。寒冷指数以 $1.32\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}/100\text{ m}$ 的递减率从海拔 800 m 的 $0.0\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}$ 降低到海拔 2100 m 的 $-18.42\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}$ 。

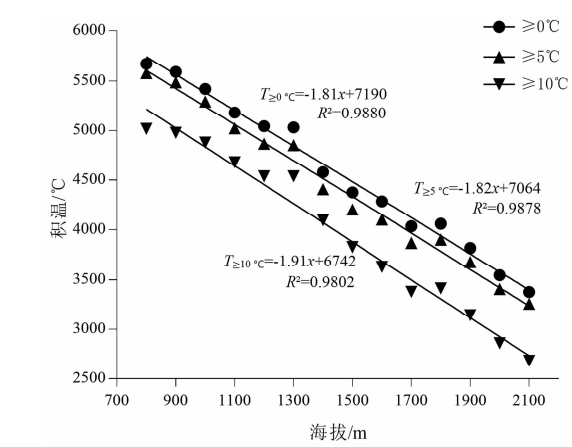


图 5 金佛山西坡积温随海拔高度的变化

Fig.5 Variation in accumulated temperature along altitudinal gradient on the west slope of Mt. Jinfo

表 3 金佛山西坡不同海拔高度温暖指数 (WI)、寒冷指数 (CI) 积温值及相应持续天数

Tab.3 Warmth index (WI), coldness index (52CI), accumulated temperature and duration at different altitudes on the west slope of Mt. Jinfo

海拔/m	CI /($^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}$)	WI /($^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}$)	日平均气温 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$		日平均气温 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$		日平均气温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	
			积温值/ $^{\circ}\text{C}$	持续天数/d	积温值/ $^{\circ}\text{C}$	持续天数/d	积温值/ $^{\circ}\text{C}$	持续天数/d
2100	-18.42	62.77	3394.85	308	3277.31	250	2703.21	175
2000	-17.03	68.04	3564.98	313	3426.11	251	2880.20	182
1900	-14.88	75.73	3838.00	319	3701.87	260	3164.66	193
1800	-12.62	74.21	4079.46	333	3925.04	266	3437.99	206
1700	-12.58	81.72	4052.71	330	3891.46	265	3402.74	205
1600	-10.88	88.68	4301.15	336	4123.00	269	3655.00	213
1500	-9.81	91.31	4393.44	341	4220.93	275	3851.08	227
1400	-8.64	96.88	4598.06	344	4424.20	280	4117.60	238
1300	-5.29	109.27	5051.69	350	4870.95	292	4561.49	248
1200	-4.41	109.01	5063.43	351	4885.97	297	4561.78	250
1100	-2.68	112.03	5206.09	353	5046.23	306	4711.34	256
1000	-1.64	118.87	5444.74	361	5315.16	318	4909.02	258
900	-0.93	124.14	5609.83	364	5506.08	328	5004.40	257
800	0.00	125.71	5690.09	365	5598.15	336	5042.56	261
平均值	-8.62	95.59	4592.04	340	4443.75	285	4000.22	226

3.6 空间插值、模型推算值与实测值的比较

各海拔高度年平均气温的空间插值 T_c 、模型推算值 T_m 与实测值 T_g 相比均存在较大差异(表4)。各海拔高度的模型计算值与实测值相比均偏大,海拔1400 m及以上站点,二者差值(ΔT_{g-m})大于1℃;海拔1400 m以下的站点,二者差值小于0.6℃。气温的空间插值整体偏小。实测值与空间插值的差值(ΔT_{g-c})在海拔最高点(2100 m)最小,为-0.10℃,在海拔最低点(800 m)最大,为2.08℃。对于气温空间插值而言,从高海拔到低海拔只有3个有效插值点,分别是1400~2100 m(8.80℃)、900~1300 m(12.20℃)以及800 m(13.40℃),未能完整地呈现气温随海拔的连续变化。

表4 金佛山西坡年平均气温的空间插值、模型推算值与实测值之间的差异

Tab.4 Differences of the annual average temperature between the spatial interpolations, the value of model estimates and the measured values, on the west slope of Mt. Jinbo

海拔/m	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{g-c}/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{g-m}/^\circ\text{C}$
2100	8.73	8.80	10.43	-0.10	-1.70
2000	9.27	8.80	10.86	0.45	-1.59
1900	10.11	8.80	11.29	1.27	-1.18
1800	10.83	8.80	11.85	2.03	-1.02
1700	10.79	8.80	12.15	1.96	-1.36
1600	11.52	8.80	12.58	2.68	-1.06
1500	11.81	8.80	13.01	2.99	-1.20
1400	12.40	8.80	13.44	3.56	-1.04
1300	13.70	12.20	13.87	1.47	-0.17
1200	13.75	12.20	14.30	1.52	-0.55
1100	14.17	12.20	14.73	1.91	-0.56
1000	14.84	12.20	15.15	2.58	-0.31
900	15.29	12.20	15.58	3.07	-0.29
800	15.50	13.40	16.01	2.08	-0.51

注: T_g 、 T_c 和 T_m 分别表示气温的实测值、气温空间插值和模型推算值; ΔT_{g-c} 和 ΔT_{g-m} 分别表示气温空间插值、模型推算值与实测值之差。

4 讨论

4.1 气温直减率

山地气温直减率受地理位置、坡向、山脉走向、植被等因子的影响而具有明显时空差异。本研究结

果表明金佛山西坡年平均气温直减率为0.53℃/100 m,高于我国北方的长白山(0.34℃/100 m)^[9]和南部黄岗山(0.43℃/100 m)^[6],低于西北部的祁连山(0.58℃/100 m)^[23]和西藏色齐拉山(0.73℃/100 m)^[35],与峨眉山气温直减率(0.54℃/100 m)^[36]相近。江净超等^[37]对我国不同区域的气温直减率的研究结果显示东部季风区气温直减率变化范围为0.22~0.63℃/100 m,西北干旱区气温直减率变化范围为0.34~0.8℃/100 m,而青藏高原区的气温直减率变化范围为0.46~0.78℃/100 m。金佛山气温直减率基本处于全国气温直减率的中间位置,与其他地区气温直减率存在一定差异,同时也说明了实地监测对小尺度气温信息获取的重要性。此外,金佛山西坡气温直减率与自由大气气温直减率0.65℃/100 m^[31]相比较低。一般来说,山地气温直减率受地形地貌和植被等众多因素影响^[7, 18],金佛山为典型的喀斯特地貌,陡岩、峡谷、台地等多有发育^[28, 29],并形成了典型的地带性植被,从而影响到气温直减率。该研究在监测点的布设上综合考虑了微地形、海拔和植被等因子的影响,研究结果可靠性高。

根据月平均气温直减率的变化特征,我国山地气温直减率可分为:春季型、夏季型、秋季型、冬季型、春秋双峰型和全年少变型^[8]。金佛山西坡不同月份间气温直减率在0.49~0.55℃/100 m内波动,与峨眉山的0.50~0.58℃/100 m^[36]大致相当,季节间气温直减率差异不明显,属于全年少变型。金佛山西部的横断山区和北部的青藏高原、大巴山、秦岭等高山有效阻挡了冬季北方冷空气的侵入,并且东南山地海拔相对较低,存在宽广的长江河谷,温暖湿润的夏季季风能深入大陆内部,从而导致该区域冬季温暖、夏季多雨,气温直减率季节差异不明显^[8, 38]。

4.2 气候与植被分布格局的关系

气候是决定陆地植被类型分布格局的最主要因素^[34, 42],众多学者将寒冷指数和温暖指数作为重要参数去描述植被的垂直分布与气候之间的关系^[10, 32, 33],有关研究结果显示温暖指数和寒冷指数在常绿阔叶林区分别为85~135℃·月和-10~0℃·月,在常绿落叶阔叶混交林区分别为80~90℃·月和-14~-10℃·月,在落叶阔叶林区分别为67.3~80℃·月和-18.8~-14℃·月^[25, 36]。

本研究中,金佛山西坡从海拔 800 m 到 2100 m 温暖指数和寒冷指数的变化范围分别为 $125.71 \sim 62.77 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}$ 和 $0 \sim -18.42 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{月}$ (表 3)。在此气候条件下,金佛山西坡的潜在植被类型应为低海拔(800 ~ 1600 m)常绿阔叶林,中海拔(1600 ~ 1900 m)常绿落叶阔叶混交林,和高海拔(1900 ~ 2100 m)的落叶阔叶林,与金佛山现有调查记录中植被实际分布基本一致^[28],表明金佛山垂直植被的形成与气候条件联系紧密。同处亚热带地区的天目山和峨眉山的研究结果也显示,植被的垂直分布格局与气候密切相关^[25, 36]。此外,金佛山常绿阔叶林分布区也分布有部分落叶阔叶林,这可能与金佛山的特殊地形有关,金佛山为典型的喀斯特台地,地表稳定性差,频繁的干扰不利于常绿阔叶树种生存^[39]。因此,在未来的研究中应当继续深入探讨在气候和地形条件共同影响下金佛山植被分布格局的形成机制。

4.3 空间插值、模型推算值与实测值的差异

总体而言,模型计算值比实测值大,但不同海拔高度的差值不同。海拔 1400 m 以下的站点差值较小($\Delta T_{g-m} < 0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$),海拔 1400 m 及以上的站点差值较大($\Delta T_{g-m} > 1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$)。在实际使用模型推算数据应当考虑海拔对数据精度的影响,相对而言低海拔地区的模型值更加可靠。气温空间插值受栅格数据分辨率限制,有效插值点较少,在小尺度缺乏海拔梯度的连续插值数据,因而难以得到不同海拔高度的气温插值。此外,在得到的 3 个有效插值数据中,除高海拔 2100 m 的站点外,所有插值气温均小于实测值。因此,在进行小尺度或者对气温精度要求较高的研究中,应该慎重使用模型值和空间插值,而应当尽量进行实地观测。

5 结论

本研究对金佛山不同海拔梯度的气温进行连续的实地监测,分析了金佛山西坡气温随海拔高度的变化规律,并比较了山地气温的空间插值、模型推算值和实测值间差异,主要结论如下:

(1) 金佛山西坡年平均气温随海拔升高而下降,气温直减率为 $0.53 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$,各月份气温直减率差异不明显,属于全年少变型。

(2) 平均最高气温、平均最低气温及全年日平

均气温随海拔升高呈线性降低;极端高温随海拔高度的变化关系不明显,最大值出现在海拔 1100 m ($48.60 \text{ }^{\circ}\text{C}$),极端低温随海拔升高而降低。

(3) 气温年较差与月均日较差沿海拔梯度呈非线性变化,二次方程拟合关系较好。

(4) 日平均气温 $\geq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温随海拔升高呈线性变化,积温递减率几乎相同,海拔每升高 100 m,稳定积温持续时间平均减少约 5 d。

(5) 根据气温地理分布模型求得气温值与实测气温相比,在各监测点均偏大,基于 WorldClim 数据库的插值气温与实测气温相比则整体偏小,且相邻海拔间气温值区分度较低。

参考文献 (References)

- [1] 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[J]. 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 [J]. Biodiversity Science, 2004, **12**(1): 10 - 19]
- [2] LI X, CHEN D, XUE B, et al. Near-surface air temperature lapse rates in the mainland China during 1962 - 2011 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, **118**(4): 7505 - 7515.
- [3] WANG L, SUN L, SHRESTHA M, et al. Improving snow process modeling with satellite-based estimation of near-surface-air-temperature lapse rate [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, **121**(20): 12005 - 12030.
- [4] RICHARD C, GRATTON D J. The importance of the air temperature variable for the snowmelt runoff modelling using SRM [J]. Hydrological Processes, 2010, **15**(18): 3357 - 3370.
- [5] GARDNER A S, SHARP M J, KOERNER R M, et al. Near-surface temperature lapse rates over arctic glaciers and their implications for temperature downscaling [J]. Journal of Climate, 2009, **22**(16): 4281 - 4298.
- [6] 郑成洋,方精云. 福建黄岗山东南坡气温的垂直变化[J]. 气象学报, 2004, **62**(2): 251 - 255. [ZHENG Chengyang, FANG Jingyun. Changes in air temperature variables along altitudinal gradient in Mt. Huanggang, China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, **62**(2): 251 - 255]
- [7] 方精云. 我国气温直减率分布规律的研究[J]. 科学通报, 1992(9): 817 - 820. [FANG Jingyun. Research on the distribution law of temperature lapse rate in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1992(9): 817 - 820]
- [8] 翁笃鸣,孙治安. 我国山地气温直减率的初步研究[J]. 地理研究, 1984, **3**(2): 24 - 34. [WENG Duming, SUN Zhian. A preliminary study of the lapse rate of surface air temperature over mountainous regions of China [J]. GEOGRAPHICAL RESEARCH,

- 1984, **3**(2): 24–34]
- [9] 田杰, 王庆伟, 于大炮, 等. 长白山北坡气温的垂直变化[J]. 干旱区资源与环境, 2013, **27**(4): 65–69. [TIAN Jie, WANG Qingwei, YU Dapao, et al. Air temperature variation along altitudinal gradient on the northern slope of Mt. Changbai [J]. China Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, **27**(4): 65–69]
- [10] FANG JingYun, SONG Yongchang, LIU Hongyan, et al. Vegetation climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China [J]. Acta Botanica Sinica, 2002, **44**(9): 1105–1122.
- [11] 李国平. 近25年来中国山地气象研究进展[J]. 气象科技进展, 2016, **6**(3): 115–122. [LI Guoping. Progress and prospects in research of mountain meteorology in china during the past 25 years [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, **6**(3): 115–122]
- [12] 胡淳焄, 柳婧, 蔡寿强, 等. 我国亚热带东部山地森林植被垂直带谱气候界限研究——以浙西南山地为例[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(S1): 143–148. [HU Chunhan, LIU Jing, CAI Shouqiang, et al. Climate boundaries in vertical forest vegetation zonation of subtropical east Chinese mountains—a case of the southwest mountainous areas in Zhejiang [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, **23**(S1): 143–148]
- [13] 张扬, 白红英, 黄晓月, 等. 近55 a 秦岭山区极端气温变化及其对区域变暖的影响[J]. 山地学报, 2018, **36**(1): 23–33. [ZHANG Yang, BAI Hongying, HUANG Xiaoyue, et al. Variation of extreme temperature and its impact on regional warming in Qinling mountains during recent 55a [J]. Mountain Research, 2018, **36**(1): 23–33]
- [14] 李新, 程国栋, 卢玲. 青藏高原气温分布的空间插值方法比较[J]. 高原气象, 2003, **22**(6): 565–573. [LI Xin, CHENG Guodong, LU Ling. Comparison study of spatial interpolation methods of air temperature over Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2003, **22**(6): 565–573]
- [15] 李军, 黄敬峰, 游松财. 不同空间尺度 DEM 对山区气温空间分布模拟的影响——以浙江省仙居县为例[J]. 地理科学, 2012, **32**(11): 1384–1390. [LI Jun, HUANG Jingfeng, YOU Songcai. The different spatial-scaling effect of DEM resolution on the simulation of temperature spatial distribution in mountainous area; a case study in Xianju county, Zhejiang province [J]. SCIENTIA GEOGRAPHICA SINICA, 2012, **32**(11): 1384–1390]
- [16] 莫申国, 张百平. 基于 DEM 的秦岭温度场模拟[J]. 山地学报, 2007, **25**(4): 406–411. [MO Shenguo, ZHANG Baiping. Simulation of temperature fields based on DEM in Qinling Mts [J]. Mountain Research, 2007, **25**(4): 406–411]
- [17] 张洪亮, 倪绍祥, 邓自旺, 等. 基于 DEM 的山区气温空间模拟方法[J]. 山地学报, 2002, **20**(3): 360–364. [ZHANG Hongliang, NI Shaoxiang, DENG Ziwang, et al. A method of spatial simulating of temperature based digital elevation model (DEM) in mountain area [J]. Mountain Research, 2002, **20**(3): 360–364]
- [18] 方精云. 地理要素对我国温度分布影响的数量评价[J]. 生态学报, 1992, **12**(2): 97–104. [FANG Jingyun. Study on the geographic elements affecting temperature distribution in China [J]. ACTA ECOLOGICA SINICA, 1992, **12**(2): 97–104]
- [19] 卢其尧. 山区年、月平均温度推算方法的研究[J]. 地理学报, 1988, **55**(3): 213–223. [LU Qiyao. A method of calculating the monthly and annual mean temperature in mountainous area [J]. Acta Geographica Sinica, 1988, **55**(3): 213–223]
- [20] 彭彬, 周艳莲, 高苹, 等. 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析——以江苏省为例[J]. 地球信息科学学报, 2011, **13**(4): 539–548. [PENG Bin, ZHOU Yanlian, GAO Ping, et al. Suitability assessment of different interpolation methods in the gridding process of station collected air temperature: a case study in Jiangsu province, China [J]. Journal of Geo-information Science, 2011, **13**(4): 539–548]
- [21] 刘伟刚, 张东启, 柳景峰, 等. 喜马拉雅山中段地区气温直减率变化特征[J]. 干旱气象, 2013, **31**(2): 240–245. [LIU Weigang, ZHANG Dongqi, LIU Jingfeng, et al. A study on temperature lapse rate on the northern and southern slopes of the central Himalayas [J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, **31**(2): 240–245]
- [22] 李巧媛, 谢自楚. 高原区气温垂直递减率的分布及其特点分析——以青藏高原及其周边地区为例[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2006, **24**(6): 719–723. [LI Qiaoyuan, XIE Zichu. Analyses on the characteristics of the vertical lapse rates of temperature—taking Tibetan Plateau and its adjacent area as an example [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2006, **24**(6): 719–723]
- [23] 张虎, 温娅丽, 马力, 等. 祁连山北坡中部气候特征及垂直气候带的划分[J]. 山地学报, 2001, **19**(6): 497–502. [ZHANG Hu, WEN Yali, MA Li, et al. The climate features and regionalization of vertical climatic zones in the northern slope of Qilian mountains [J]. Mountain Research, 2001, **19**(6): 497–502]
- [24] 薛丽芳, 王春林, 申双和. 粤北南岭精细化气候资源分布及区划研究[J]. 中国农业气象, 2011, **32**(S1): 178–183. [XUE Lifang, WANG Chunlin, SHEN Shuanghe. The fine distribution of climate resources and zoning study of Nanling in northern Guangdong province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, **32**(S1): 178–183]
- [25] Da LJ, KANG MM, SONG K. Altitudinal zonation of human-disturbed vegetation on Mt. Tianmu, eastern China [J]. The Ecological Society of Japan, 2009, **24**(6): 1287–1299.
- [26] 谢光辉. 莽山地区气温、降水垂直变化特点及农林布局对策[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 1992, **15**(4): 377–382. [XIE Guanghui. Characteristics of temperature and precipitations vertical variations and countemeasures of distributions on

- agriculture and forestry in mangmountains region [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 1992, **15** (4): 377–382]
- [27] MYERS N, MITTERMEIER RA, MITTERMEIER CG, et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities [J]. Nature, 2000, **403**(6772): 853–858.
- [28] 马声远, 马建伦, 王霞, 等. 金佛山自然保护区科学考察集 [M]. 重庆: 重庆南川市林业局, 1998: 35–65. [MA Shengyuan, MA Jianlun, WANG Xia, et al. MT. Jinfo Nature Reserve scientific investigation report [M]. Chongqing: Forestry Bureau of Chongqing Nanchuan, 1998: 35–65]
- [29] 张治伟, 许娟娟, 严焕德, 等. 海拔与岩性变异对石灰岩发育土壤黏土矿物组成的影响 [J]. 土壤学报, 2017, **54** (2): 535–542. [ZHANG Zhiwei, XU Juanjuan, YAN Huande, et al. Effects of elevation and lithology on clay mineral composition of soils derived from limestone [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, **54** (2): 535–542]
- [30] QIAN S, YANG YC, TANG CQ, et al. Effective conservation measures are needed for wild *Cathaya argyrophylla* populations in China: insights from the population structure and regeneration characteristics [J]. Forest Ecology and Management, 2016, **361**: 358–367.
- [31] 伍光和王乃昂. 自然地理学 (第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 91–99. [WU Guanghe, WANG Naiang. Physical Geography (Fourth Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 91–99]
- [32] KIRA T. Forest ecosystems of east and southeast Asia in a global perspective [J]. Ecological Research, 1991, **6** (2): 185–200.
- [33] OHSAWA M. An interpretation of latitudinal patterns of forest limits in south and east Asian mountains [J]. Journal of Ecology, 1990, **78** (2): 326–339.
- [34] 宋永昌. 植被生态学 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2017: 528–533. [SONG Yongchang. Vegetation Ecology (Second Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2017: 528–53]
- [35] 杜军, 高荣, 马鹏飞, 等. 西藏色齐拉山地区立体气候特征初步分析 [J]. 高原山地气象, 2009, **29** (1): 14–18. [DU Jun, GAO Rong, MA Pengfei, et al. Analysis of stereoscopic climate features on Mt. Seqilha, Tibet [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2009, **29** (1): 14–18]
- [36] CINDY Q T, OHSAWA M. Zonal transition of evergreen, deciduous, and coniferous forests along the altitudinal gradient on a humid subtropical mountain, Mt. Emei, Sichuan, China [J]. Plant Ecology, 1997, **133** (1): 63–78.
- [37] 江净超, 刘军志, 秦承志, 等. 中国近地表气温直减率及其季节和类型差异 [J]. 地理科学进展, 2016, **35** (12): 1538–1548. [JIANG Jingchao, LIU Junzhi, QIN Chengzhi, et al. Near-surface air temperature lapse rates and seasonal and type differences in China [J]. Progress in Geography, 2016, **35** (12): 1538–1548]
- [38] 王幸. 基于 GIS 的我国山区气温直减率的研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015. [WANG Xing. Research on the lapse rate of mountain temperature in China based on GIS [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015]
- [39] 杨永川. 中国中亚热带东部低山丘陵地形梯度上植被的分异及其形成和维持机制 [D]. 上海: 华东师范大学, 2005. [YANG Yongchuan. Differentiation and maintenance of vegetation patterns along the topographical gradients in Mid-subtropical hilly and lower mountainous area in east China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2005]
- [40] 王智, 师庆东, 常顺利, 等. 新疆地区平均气温空间插值方法研究 [J]. 高原气象, 2012, **31** (1): 201–208. [WANG Zhi, SHI Qingdong, CHANG Shunli, et al. Study on spatial interpolation method of mean air temperature in Xingjiang [J]. Plateau Meteorology, 2012, **31** (1): 201–208]
- [41] 汪建华, 周先容, 尚进, 等. 金佛山巴山榿树灌丛群落主要木本植物种群生态位特征 [J]. 生态学报, 2014, **33** (5): 1135–1141. [WANG Jianhua, ZHOU Xianrong, SHANG Jin, et al. Niche characteristics of dominant woody plant populations in a *Torreya fargesii* shrub community in the Jinfo mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **33** (5): 1135–1141]
- [42] 王建雷, 李英年, 杜明远, 等. 祁连山冷龙岭南坡小气候及植被分布特征 [J]. 山地学报, 2009, **27** (4): 418–426. [WANG Jianlei, LI Yingnian, DU Mingyuan, et al. The features of microclimate and vegetation distribution the southern Lenglonglin, Qilian mountains [J]. Mountain Research, 2009, **27** (4): 418–426]

Vertical Change in Air Temperature on the West Slope of Mt. Jinfo, China

ZHOU Lihua¹, HUANG Li¹, QIAN Shenhua¹, LI Li^{2*}, YANG Yongchuan¹

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region Eco-Environment of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The temperature records measured in mountains serve as basic data for scientific support of related disciplines, and for years the concern about the altitude variation in mountain temperature have grown in mountain researchers. Jinfo Mountain is the main peak of the Dalou Mountains, Yunnan-Kweichow Plateau, China, and it is a major component of Southern China Karst World Heritage, featured by important ecological value. In this study, it installed 14 sets of HOBO Onset micro climatic recorders on the west slope of Mt. Jinfo and had recorded continuously the temperature in 30min intervals at 14 sites from June 2017 to June 2018. And based on this, it analyzed the temporal difference and vertical variation of temperature on the west slope of Mt. Jinfo. The results showed that: (1) The annual average temperature lapse rate on the west slope of Mt. Jinfo was 0.53 °C/100 m, with minor difference between months; (2) The average maximum temperature, average minimum temperature, and annual average temperature all decreased linearly with increasing altitude, while the extreme-high temperature did not change significantly along the elevational gradient; (3) The monthly mean daily range varied with elevation in a quadratic curve; (4) The accumulated temperature of ≥ 0 °C, ≥ 5 °C, and ≥ 10 °C all decreased linearly with increasing altitude, with a decreasing rate of accumulated temperature almost the same (approximately 184.2 °C/100 m), and the corresponding duration for accumulated temperature continued to decrease by 5d for per 100 m increase in elevation; (5) Compared with the measured temperature in-situ, the calculated temperature based on the temperature geographical distribution model was higher at each monitoring site, while the interpolated temperature based on WorldClim database was lower as a whole.

Key words: vertical change; temperature lapse rate; Mt. Jinfo; Chongqing