

王芳, 卢尧舜, 张昭臣, 等. 江西官山亚热带森林近地表和土壤温度的海拔梯度变化及其季节动态. 应用生态学报, 2023, 34(5): 1161-1168

Wang F, Lu YS, Zhang ZC, et al. Altitudinal variations and seasonal dynamics of near-surface and soil temperatures in subtropical forests of Mt. Guanshan, Jiangxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(5): 1161-1168

江西官山亚热带森林近地表和土壤温度的海拔梯度变化及其季节动态

王芳¹ 卢尧舜¹ 张昭臣² 陈琳³ 杨永川⁴ 张宏伟¹ 王潇然¹ 舒丽¹
商晓凡¹ 刘鹏程¹ 杨清培⁵ 张健^{1*}

(¹华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241; ²江西省中国科学院庐山植物园, 江西九江 332900; ³江西官山国家级自然保护区管理局, 江西宜春 336000; ⁴重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; ⁵江西农业大学江西省竹子种质资源与利用重点实验室, 南昌 330045)

摘要 温度直减率作为反映温度沿海拔变化程度的参数, 是研究山地生态系统众多生态过程的重要指标。目前大多数研究集中于流层或近地表温度, 而土壤温度作为影响生物生长发育、生态系统物质循环等过程的重要因子, 其垂直变化研究比较缺乏。本研究基于江西官山国家级自然保护区 300~1300 m 海拔范围内的 12 个亚热带森林样点 2018 年 9 月—2021 年 8 月林下近地表(地上 15 cm)和土壤温度(地下 8 cm)数据, 利用线性回归模型计算近地表和土壤的均温、最高温、最低温直减率和积温递减率, 并分析其季节动态。结果表明: 研究区近地表年均温、最高温、最低温的直减率分别为 0.38、0.31、0.51 °C · (100 m)⁻¹, 三者差异较大, 而土壤的三者变化较小, 分别为 0.40、0.38、0.42 °C · (100 m)⁻¹; 除最低温直减率, 近地表和土壤的温度直减率均无显著季节差异。近地表最低温直减率在春、冬季节较大, 而土壤最低温直减率在春、秋季节较大; 近地表和土壤积温均与海拔呈显著负相关, ≥ 5 °C 积温递减率分别为 163 和 179 °C · d · (100 m)⁻¹, 且相同海拔的土壤 ≥ 5 °C 积温持续天数均较近地表长 15 d 左右。近地表和土壤温度沿海拔的变化呈现出不同的规律, 与近地表温度相比, 土壤较强的缓冲能力使得土壤温度及其直减率的季节差异较小。

关键词 森林微气候; 温度直减率; 季节动态; 常绿阔叶林; 海拔梯度

Altitudinal variations and seasonal dynamics of near-surface and soil temperatures in subtropical forests of Mt. Guanshan, Jiangxi Province, China. WANG Fang¹, LU Yaoshun¹, ZHANG Zhaochen², CHEN Lin³, YANG Yongchuan⁴, ZHANG Hongwei¹, WANG Xiaoran¹, SHU Li¹, SHANG Xiaofan¹, LIU Pengcheng¹, YANG Qingpei⁵, ZHANG Jian^{1*} (¹School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; ²Lushan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Jiujiang 332900, Jiangxi, China; ³Administration of Jiangxi Guanshan National Nature Reserve, Yichun 336000, Jiangxi, China; ⁴Ministry of Education Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Chongqing University, Chongqing 400045, China; ⁵Jiangxi Provincial Key Laboratory for Bamboo Germplasm Resources and Utilization, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China).

Abstract: Temperature lapse rate (TLR), measured as the degree of temperature change along an altitudinal gradient, is a key indicator of multiple ecological processes of mountain systems. Although many studies have examined temperature changes of open air or near-surface along altitudes, we know little about altitudinal variations of soil temperature, which play an important role in regulating growth and reproduction of organisms, as well as ecosystem nutrient cycling. Based on temperature data of near-surface (15 cm above ground) and soil layers (8 cm below ground) from 12 sampling sites of subtropical forest along an altitudinal gradient (300–1300 m) in Jiangxi Guanshan National Nature Reserve from September 2018 to August 2021, we calculated the lapse rates of mean, maximum, and minimum temperatures, as well as accumulated temperatures by using simple linear regression for both near-surface and soil temperature. The seasonal dynamics of aforementioned variables were also evaluated. The

本文由国家自然科学基金面上项目(32071538)和上海自然科学基金面上项目(20ZR1418100)资助。

2022-12-06 收稿, 2023-02-13 接受。

* 通信作者 E-mail: jzhang@des.ecnu.edu.cn

results showed that there were large differences among mean, maximum, and minimum lapse rates for annual near-surface temperature, which were 0.38, 0.31 and 0.51 $^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$, respectively. But little variation was documented for soil temperature which were 0.40, 0.38 and 0.42 $^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$, respectively. The seasonal variations of temperature lapse rates for near-surface and soil layers were minor except for minimum temperature. The lapse rates of minimum temperature were deeper in spring and winter for near-surface and in spring and autumn for soil layers. For growing degree days (GDD), the accumulated temperature under both layers were negatively correlated with altitude, and the lapse rates of $\geq 5^{\circ}\text{C}$ were 163 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ for near-surface and 179 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ for soil. The $\geq 5^{\circ}\text{C}$ GDD in soil were about 15 days longer than that in near-surface at the same altitude. The results showed inconsistent patterns of altitudinal variations between near-surface and soil temperature. Soil temperature and its lapse rates had minor seasonal variations compared with the near-surface counterparts, which was related to the strong buffering capacity of soil.

Key words: forest microclimate; temperature lapse rate; seasonal dynamics; evergreen broad-leaved forest; altitudinal gradient.

山地通过其独特的地形地貌(如起伏程度、坡向、坡度)和植被结构等将光、热、水等进行再分配,使得山地气候在垂直分布上存在明显分异^[1]。山地沿海拔梯度的气候变化(如温度)是沿纬度梯度的上千倍,拥有丰富的生物多样性,使得山地成为生态学研究天然实验室以及全球变化的前哨^[2-3]。温度直减率指温度随海拔升高而降低的幅度^[4],作为重要参数被广泛应用在生态学、水文学等研究中^[5-6]。山地温度的海拔差异直接影响着生物的重要代谢过程(如光合、呼吸作用)及其生理特征,这导致海拔梯度上的生物生长与繁殖、功能性状及物候等存在较大差异^[7],进而影响物种的海拔分布范围,以及山地生态系统的群落组成与结构^[8]。气候变暖是造成物种向上迁移的重要原因,因此,温度的垂直变化为气候变暖下的山地生态系统响应提供了重要依据^[9-10]。

森林近地表层是植物种子萌发和幼苗更新、动物觅食、微生物分解、生物地球化学循环等的重要场所^[11-12]。在全球变化背景下,近地表植被覆盖与微地形等造成的热量再分配为山地很多中小型物种提供了很多小型避难所^[13]。例如,在森林冠层的遮荫、蒸发冷却等作用下,森林微气候减缓了植物的热化速率^[11,14-15]。目前,对流层温度直减率 $[0.6^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}]$ 被生态学研究广泛使用^[16],但受山地所处的气候条件、地形地貌、植被覆盖等诸多因素影响,近地表大气温度(以下简称近地表温度)与对流层温度可能存在较大差异,尤其是在郁闭度较高的山地森林生态系统^[14,17]。因此,分析山地近地表温度直减率的变化规律可以更准确地理解山地生态系统生物多样性的维持机制。

近地表温度直减率受所处区域的气候条件、山地独特的地形地貌等因素影响,这使得不同山地区

的近地表温度直减率有较大差异。例如,安第斯山脉南部、吉林长白山、重庆金佛山的近地表温度直减率分别为 0.69、0.30、0.53 $^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ ^[18-20]。一般认为,温暖干燥的区域近地表温度直减率更大^[21-22]。由于夏季太阳辐射明显增加,以及冬季较强的季风影响,我国大部分山地的近地表温度直减率的季节变化特征为夏季型,呈现夏季高、冬季低的特征^[21]。许多研究表明,最高、最低温度是解释全球气候变化下生物响应过程的重要驱动因子。比如,热带森林生态系统的碳储存受高温影响^[23],低温会影响种子萌发和幼苗生长等多个过程^[24]。最高、最低温度的垂直变化特征可能具有重要的生态学意义。另外,积温作为重要的热量资源指标,对于全球变暖背景下的生物物候也具有重要影响。但受可获得数据等的限制,目前国内外研究多集中在年均温直减率,较少考虑最高温、最低温和积温的海拔变化及其季节动态。

土壤温度直接影响土壤动物和微生物的结构组成以及生理活动,影响土壤酶活性,进而影响凋落物分解等物质循环和能量交换的重要过程以及植物种子萌发、根系生长等生理过程^[15,25]。但目前关于土壤温度垂直递减率的研究较少,仅在祁连山、长白山等山地有所研究^[26-27]。受近地表温度、植被覆盖、土壤理化性质等诸多因素影响,土壤温度的垂直变化与近地表具有显著差异,如祁连山西坡和长白山西坡苔原带的土壤温度直减率分别为 0.23^[26]、0.44 $^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ ^[27],但西藏色季拉山的土壤温度却无明显海拔变化^[28]。另外,目前对近地表温度与土壤温度关系的研究较为缺乏,而土壤层至近地表这一区域是种子萌发到幼苗和幼树更新等早期群落动态的重要环境空间,有待深入研究。

官山国家级自然保护区位于江西宜丰九岭山脉

的西端,是鄱阳湖平原、江汉平原以及洞庭湖平原之间的“生态孤岛”,是华东植物区系与华中、华南植物区系的交汇带,植物区系的过渡性明显,拥有丰富的起源古老和珍稀的动植物资源,对长江中游生物多样性保护具有重要意义^[29]。本研究基于官山近地表和土壤温度 2018—2021 年的监测数据,分析近地表和土壤均温、最高温、最低温、积温沿海拔的垂直变化特征,探究各指标在不同海拔、不同季节的差异,为理解亚热带山地生物多样性维持机制以及不同物种对全球变化的响应规律提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

官山国家级自然保护区(28°30′—28°40′ N, 114°29′—114°45′ E)位于江西省宜春市九岭山脉的西段,主峰麻姑尖海拔 1480 m,保护区总面积 11500.5 hm²。该区属于中亚热带温暖湿润气候,年均气温 16.2 °C,夏季平均气温为 26.1 °C,冬季最低温度可达 0 °C 以下,年降水量 1950~2100 mm,平均相对湿度为 85%。从低海拔到高海拔,植被类型依次为常绿阔叶林(200~400 m)、常绿和落叶阔叶混交林(400~800 m)、落叶阔叶和针叶混交林(800~1100 m)、山顶矮林和山顶灌草丛(1100~1480 m)^[29]。

1.2 温度监测

综合植被代表性、海拔跨度等多方面因素,在官山西坡海拔 300~1300 m 之间,按约 100 m 的海拔间隔设置 12 个 20 m×20 m 的森林固定样地。样地海拔和经纬度由精度小于 1 m 的差分 GPS(Trimble Geo 7X)测量得到(图 1a),样地经纬度范围为 28°33′—28°35′ N,114°34′—114°36′ E,平均坡度 15°。TMS 温湿度记录仪(TMS-4; 温度范围为-55~125 °C,分辨率为 0.0625 °C)用于获取近地表(地上 15 cm)和土壤温度(地下 8 cm)数据^[30]。将官山各样地中心地面上的枯枝落叶等清理干净,再将套上辐射罩的 TMS 温湿度记录仪竖直插入土中,并套上一个铁笼避免仪器受到动物等破坏(图 1b)。TMS 每 15 min 记录一条温度数据并自动贮存,本研究使用 12 个监测点 2018 年 9 月 1 日至 2021 年 8 月 31 日的近地表和土壤温度数据。

1.3 数据处理

在 R 语言 4.2.1^[31]和 Excel 2016 软件中对数据进行检查和整理,删除极少量异常值。各海拔的月平均温度由每日平均温度求得,将每月的所有温度按从小到大进行排序后分别取前 5% 和后 5% 的温

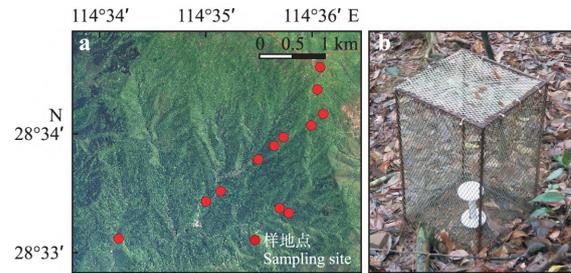


图 1 官山固定样地位置 (a) 和 TMS 温湿度记录仪实地安置图 (b)

Fig.1 Location of Guanshan permanent sampling plots (a) and field setup of TMS loggers (b).

度进行平均求得月均最低和最高温^[32],最终获得年均温度。由于监测点之间的经纬度差异小,所以忽略经纬度等对温度直减率的影响。对各海拔的最高、最低、平均温度分别进行简单线性回归,得出最高温、最低温、均温的直减率^[4],计算公式如下:

$$T = \beta_1 \times ELEV + \beta_0$$

式中: ELEV 为海拔(m); T 为温度(°C); β_1 为温度直减率[°C·(100 m)⁻¹]; $\beta_1 > 0$ 表示温度随海拔升高而减小, $\beta_1 < 0$ 表示温度随海拔升高而增大; β_0 为截距。采用 5 日滑动平均法分别计算 ≥ 0 °C、 ≥ 5 °C、 ≥ 10 °C 界限温度的始日和终日日期,累加始日和终日时段内的日平均温度即为积温^[33],并对各海拔积温进行简单线性回归,回归曲线的斜率即为积温沿海拔的递减率(以下简称积温递减率)。为检验近地表与土壤两者间温度和温度直减率的差异,分别采用成对 Wilcoxon 秩和检验、成对 t 检验进行验证。

2 结果与分析

2.1 近地表和土壤均温的月际变化特征

官山近地表和土壤温度在 1 月最低、8 月最高(图 2)。最低海拔(300 m)与最高海拔(1300 m)的平均温差在 3.5~4.0 °C。近地表和土壤温度随季节变化有显著差异,春、夏季近地表温度略高于土壤温度,温差 0.5 °C 左右;秋、冬季,由于土壤良好的保温作用,土壤温度远高于近地表温度,温差在 1~2 °C,12 月的温差超过 3 °C。

2.2 近地表和土壤均温直减率的月际变化特征

从海拔 300 m 到 1300 m,近地表年均温从 15.0 °C 降到 11.4 °C,土壤年均温从 15.5 °C 降到 11.5 °C,近地表和土壤的年均温直减率分别为 0.38 和 0.40 °C·(100 m)⁻¹,近地表年均温沿海拔的拟合公式为: $T_{\text{mean}} = -0.38ELEV + 17.03$ ($R^2 = 0.85$); 土壤年均温沿海拔的拟合公式为: $T_{\text{mean}} = -0.40ELEV + 17.15$

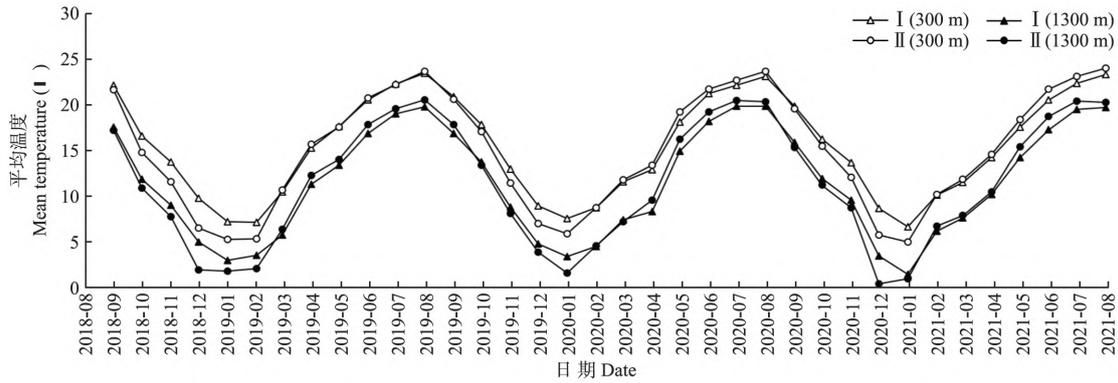


图2 海拔300、1300 m样地的近地表和土壤月均温的变化
Fig.2 Monthly mean temperatures of near-surface and soil at the altitudes of 300 and 1300 m.
 I: 土壤 Soil; II: 近地表 Near-surface. 下同 The same below.

($R^2 = 0.93$, 图3)。近地表和土壤月均温直减率呈现相似的双峰曲线(图4)。近地表与土壤均温直减率从春季峰值[3月近地表: $0.42\text{ }^\circ\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ 、4月土壤: $0.43\text{ }^\circ\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$]不断下降到夏季[7月近地表和土壤分别为 0.32 和 $0.34\text{ }^\circ\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$]之后又回升到9月再次达到峰值[近地表和土壤分别为 0.43 和 $0.46\text{ }^\circ\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$]。整体来看,近地表与土壤的均温直减率差异虽较小但仍具有显著差异。

2.3 近地表和土壤最高温和最低温直减率的月际变化特征

从海拔300 m到1300 m,近地表年均最高温从

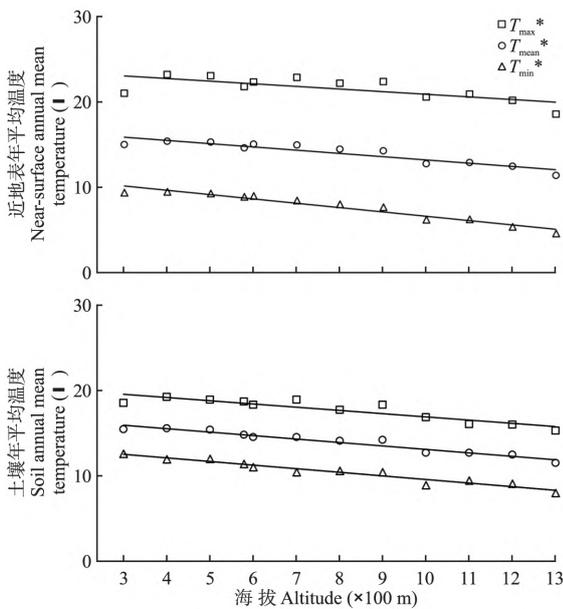


图3 近地表和土壤年均温度沿海拔的变化
Fig.3 Mean annual temperatures of near-surface and soil along the altitude.

T_{\max} : 最高温 Maxium temperaure; T_{mean} : 平均温 Mean temperaure; T_{\min} : 最低温 Minimum temperaure. * 年平均温度与海拔具有显著相关性 ($P < 0.01$) * significant correlation between annual mean temperature and altitude at 0.01 level.

21 $^\circ\text{C}$ 降至 18.6 $^\circ\text{C}$, 土壤年均最高温从 18.5 $^\circ\text{C}$ 降至 15.3 $^\circ\text{C}$, 近地表和土壤年均均温直减率分别为 0.31 、 $0.38\text{ }^\circ\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$, 近地表年均最高温沿海拔的拟合公式为: $T_{\max} = -0.31ELEV + 23.99$ ($R^2 = 0.47$), 土壤年均最高温沿海拔的拟合公式为: $T_{\max} = -0.38ELEV + 20.69$ ($R^2 = 0.81$, 图3)。近地表和土壤温度的月平均最高温直减率均无明显月际变化规律(图5)。近地表和土壤最高温直减率分别在 $0.21 \sim 0.38$ 、 $0.33 \sim 0.44\text{ }^\circ\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ 范围内变化。整体来看,近地表与土壤最高温直减率有显著差异。

近地表年均最低温从海拔300 m的9.4 $^\circ\text{C}$ 下降到海拔1300 m的4.6 $^\circ\text{C}$, 土壤年均最低温从12.6 $^\circ\text{C}$ 降到8.0 $^\circ\text{C}$, 近地表和土壤年均均温直减率分别为 0.51 、 $0.42\text{ }^\circ\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$, 近地表年均最低温沿海拔的拟合公式为: $T_{\min} = -0.51ELEV + 11.75$ ($R^2 = 0.94$), 土壤年均最低温沿海拔的拟合公式为: $T_{\min} = -0.42ELEV + 13.78$ ($R^2 = 0.93$, 图3)。近地表和土壤年均最低温直减率的月际变化均呈双峰模式(图5)。近地表与土壤最低温直减率从春季峰值[3月

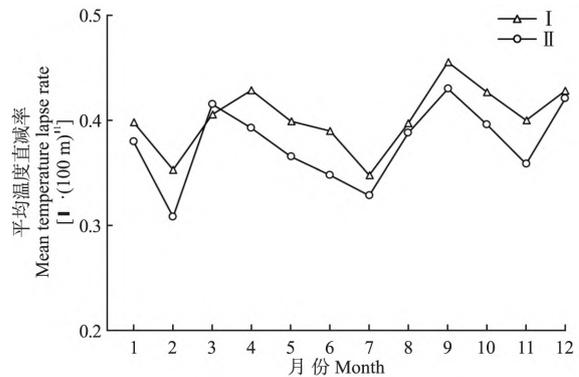


图4 近地表和土壤均温直减率的月际变化
Fig.4 Monthly variation of the mean temperature lapse rates of near-surface and soil.

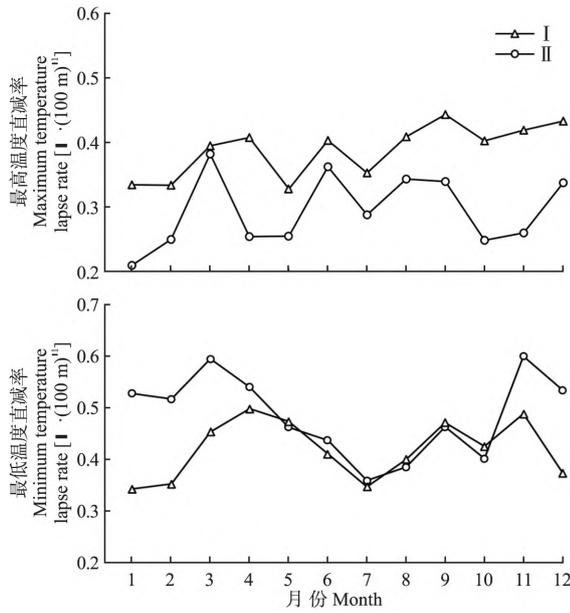


图 5 近地表和土壤最高温直减率和最低温直减率的月际变化
Fig.5 Monthly variation of near-surface and soil in the lapse rates of maximum temperature and minimum temperature.

近地表: $0.59\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$; 4 月土壤: $0.50\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ 不断下降到夏季(7 月) 达到最低值 [近地表和土壤分别为 0.35 和 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$] 秋季有所回升, 11 月再次达到峰值 [近地表和土壤分别为 0.60 和 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$], 之后再次下降。整体而言, 近地表最低温直减率在春冬较大、夏秋较小, 土壤最低温直减率在春秋较大、夏冬较小。与均温和最高温不同, 近地表最低温直减率整体显著大于土壤最低温的直减率, 其中, 冬季差异最大, 可达 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$, 夏季差异很小。

2.4 近地表和土壤积温随海拔的变化特征

近地表温度 ≥ 0 、 ≥ 5 和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温均与海拔呈极显著的线性负相关(图 6), 其每 100 m 的递减率分别为 139、163、162 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 其沿海拔的拟合公式分别为: $AT_0 = -139ELEV + 6239 (R^2 = 0.86)$ 、 $AT_5 = -163ELEV + 6201 (R^2 = 0.93)$ 、 $AT_{10} = -162ELEV + 5663 (R^2 = 0.87)$ 。 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是许多植物开始萌芽生长的重要界限温度, 在海拔 300 m, 近地表 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温持续时间在 1—12 月, 海拔 1300 m, 近地表 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温持续时间在 3—11 月, 与海拔 300 m 相比, 起始时间延迟 49 d, 终止时间提前 32 d, 累积持续天数缩短了 81 d。从海拔 300 m 到 1300 m, 近地表 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温累积持续天数分别减少 9、74 d。

土壤温度 ≥ 0 、 ≥ 5 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温也均与海拔呈极显著负相关(图 6), 每 100 m 的递减率分别为

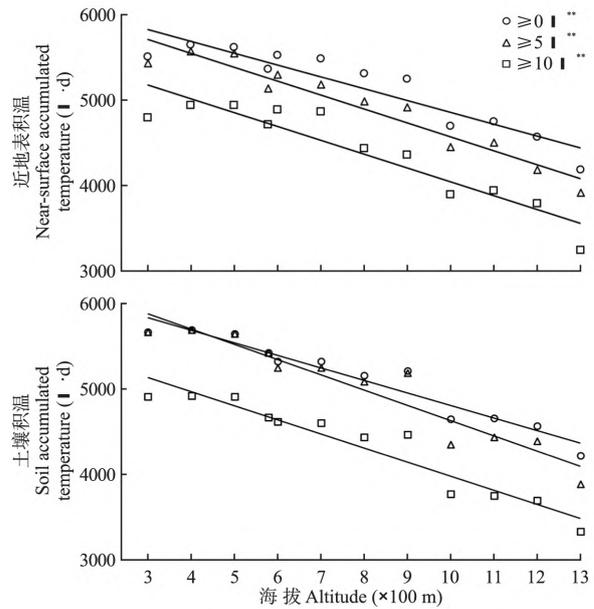


图 6 近地表和土壤 ≥ 0 、 ≥ 5 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温沿海拔的变化
Fig.6 Altitudinal variation of ≥ 0 、 ≥ 5 and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ accumulated temperatures of near-surface and soil.

** 积温与海拔具有极显著相关性 ($P < 0.001$) ** extremely significant correlation between accumulated temperature and altitude at 0.001 level.

147、179、165 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 其沿海拔的拟合公式分别为: $AT_0 = -147ELEV + 6279 (R^2 = 0.94)$ 、 $AT_5 = -179ELEV + 6421 (R^2 = 0.91)$ 、 $AT_{10} = -165ELEV + 5631 (R^2 = 0.92)$ 。海拔 300 m 处, 土壤年均温都超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 海拔 1300 m 处, $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温持续时间为 3—12 月, 累积天数比近地表长 14 d, 比海拔 300 m 累积天数缩短 84 d。从海拔 300 m 到 1300 m, $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温累积持续天数分别减少 0、67 d。近地表和土壤 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温及其持续天数均无明显差异, 但 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温及其持续天数却存在显著差异; 近地表和土壤 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温虽无明显差异, 但持续天数却有显著差异。

3 讨 论

3.1 近地表和土壤温度直减率及其季节变化特征

江西官山近地表年均温直减率为 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$, 与普遍认为的对流层温度直减率 [$0.60\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$] 有较大差异。长期动态监测的林下微气候与林下生物群落关系更密切, 将对流层温度直减率直接用于山地系统林下群落的研究存在明显不足^[17, 34]。与同为亚热带湿润气候区的各山地相比, 本研究区近地表年均温直减率与福建武夷山较为接近, 但与重庆金佛山存在较大差异^[20, 35]。太阳辐射、植被覆盖、风速、降水和坡度等微地形因素

会影响近地表处对太阳辐射的吸收、反射,使得不同山地甚至是同一山地在不同季节、坡向的温度直减率之间存在明显差异^[14,34,36]。整体而言,官山近地表和土壤的最高温直减率在冬季较小,其余季节并无明显差异,这可能与冬季较弱的太阳辐射相关^[22];均温直减率在夏季最小,可能是官山高海拔地区以灌草丛为主的稀疏植被使得近地表接受的热量更多,加之充沛的降水使夏季的温度直减率明显减小^[14,29]。近地表和土壤的最低温度直减率月际变化均呈双峰模式,但季节动态有所不同,可能与夜间风速、土壤缓冲能力等有关^[22]。

3.2 近地表与土壤温度直减率的比较

热传导、热对流和热辐射等热传递过程使大气与土壤的温度具有较强相关性,但土壤性质、植被覆盖等又使得两者存在显著差异。这种差异可能导致许多生物在不同生活史阶段所经历的微环境不同,然而很多研究忽略了对土壤温度的长期监测及其对凋落物分解、微生物活动、植物早期生活史等的影响^[11]。江西官山土壤温度直减率与长白山西坡苔原带较为接近,但与祁连山存在较大差异^[26]。不同山地的差异来源于影响近地表温度的众多因素(如区域气候、植被覆盖等),以及土壤组成、水分等土壤性质。这些因素还造成土壤与近地表温度及其直减率存在差异。官山土壤的月均温、最高温直减率略高于近地表,而土壤的最低温直减率则大于近地表。与近地表温度相比,土壤温度随海拔上升而下降得更剧烈,可能会使土壤生物在海拔梯度上拥有更丰富的类群。土壤良好的缓冲能力使土壤最高温、最低温、均温及其直减率之间并无明显差异,季节差异也较小。在这样的环境条件下,各海拔的土壤层群落结构及组成较为稳定,但群落组成沿海拔变化较大。

3.3 最高温和最低温直减率的比较

近地表和土壤的最低温直减率均大于最高温直减率,尤其是近地表在冬季差异更明显,与秦岭西部山地直减率的研究结果一致^[37],但与欧洲安第斯山的结果相反^[19]。最低温和最高温带来的温度胁迫可能会影响生物的耐热性,改变其行为形态、生理特征、海拔分布等多方面。本研究区最低温度在海拔梯度上的变化较为剧烈,在长时间尺度上可能会导致不同海拔的种群产生适应性分化现象,物种向上迁移困难,或者有选择地使比如温带物种顺利向高

海拔迁移,影响山地垂直梯度上的生物多样性格局^[8,38]。

3.4 近地表和土壤积温随海拔的变化

近地表和土壤 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温沿海拔的变化差异并不显著, $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为许多植物开始萌芽生长的重要界限温度,其积温递减率以及持续天数却存在显著差异。对于近地表,土壤积温沿海拔上升而下降的幅度更为剧烈,但相同海拔的持续天数却明显延长。近地表与土壤积温的显著差异强调,植物在不同生活史阶段经历的环境条件具有显著差异,选择适宜的环境温度对于准确预测林下植物群落更新动态具有重要意义。

从海拔 300 m 到 1300 m,近地表和土壤 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的持续天数均缩短 80 d 左右。春季物候和秋季物候在高海拔处分别存在明显的延迟和提前,从而影响物种间相互作用并最终影响山地生态系统的植被组成和生产力^[39]。作为华东植物区系与华中、华南植物区系的交汇带,官山的植被组成由低海拔的小叶青冈(*Quercus myrsinifolia*)、锥栗(*Castanea henryi*)等高大乔木为主转变为高海拔的以云锦杜鹃(*Rhododendron fortunei*)、江浙山胡椒(*Lindera chienii*)等灌木或小乔木为主,除了受生物地理、扩散限制等影响外,温度沿海拔的变化也有重要影响^[12,40]。

本研究对江西官山 2018—2021 年林下近地表和土壤温度数据的分析表明,近地表与土壤之间的热交换过程让两者温度及其直减率拥有较为相似的季节变化规律,但两者的温度、温度直减率以及 $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温递减率均存在显著差异。与近地表相比,土壤温度沿海拔梯度下降的幅度更剧烈,但土壤良好的缓冲能力使得相同海拔的土壤最高、最低温差异较小且季节变化更小。在很多生态学研究,普遍使用 1.5~2 m 或更高位置甚至是开阔地或对流层的气候数据,极少考虑土壤与近地表之间的温度差异,忽略了许多生物(尤其是活动范围较小的生物,如植物幼苗、土壤动物、昆虫等)的微避难所(micro-refugia)^[11]对于林下尤其是发生在近地表区域的土壤呼吸、种子萌发、幼苗更新等维持生物多样性与生态系统功能的重要生态过程预测可能出现较大偏差。微气候数据在时空尺度上的不断累积^[32]对深入揭示局域、区域和全球尺度上植被覆盖、土壤养分组成等与温度之间的耦合关系,以及理解山地不同

生物类群的多样性维持机制具有重要意义。

参考文献

- [1] Barry RG. Mountain Weather and Climate. 3rd Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008
- [2] Körner C. The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, **22**: 569-574
- [3] Sundqvist MK, Sanders NJ, Wardle DA. Community and ecosystem responses to elevational gradients: Processes, mechanisms, and insights for global change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2013, **44**: 261-280
- [4] Fang JY, Yoda K. Climate and vegetation in China. I. Changes in the altitudinal lapse rate of temperature and distribution of sea level temperature. *Ecological Research*, 1988, **3**: 37-51
- [5] Prentice IC, Cramer W, Harrison SP, et al. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 1992, **19**: 117-134
- [6] Graae BJ, De Frenne P, Kolb A, et al. On the use of weather data in ecological studies along altitudinal and latitudinal gradients. *Oikos*, 2012, **121**: 3-19
- [7] Körner C. Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems. 2nd Ed. Heidelberg, Berlin: Springer, 2003
- [8] Chan WP, Ching CI, Colwell RK, et al. Seasonal and daily climate variation have opposite effects on species elevational range size. *Science*, 2016, **351**: 1437-1439
- [9] Lenoir J, Gegout JC, Marquet PA, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 2008, **320**: 1768-1771
- [10] Pepin N, Bradley RS, Diaz HF, et al. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 2015, **5**: 424-430
- [11] Ashcroft MB, Gollan JR. Moisture, thermal inertia, and the spatial distributions of near-surface soil and air temperatures: Understanding factors that promote microrefugia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **176**: 77-89
- [12] Ma LW, Liu L, Lu YS, et al. When microclimates meet soil microbes: Temperature controls soil microbial diversity along an elevational gradient in subtropical forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, **166**: 108566
- [13] Dobrowski SZ. A climatic basis for microrefugia: The influence of terrain on climate. *Global Change Biology*, 2011, **17**: 1022-1035
- [14] De Frenne P, Zellweger F, Rodriguez-Sanchez F, et al. Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, **3**: 744-749
- [15] Zellweger F, de Frenne P, Lenoir J, et al. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science*, 2020, **368**: 772-775
- [16] Wallace JM, Hobbs PV. Atmospheric Science: An Introductory Survey. 2nd Ed. Cambridge: Academic Press, 2006
- [17] Minder JR, Mote PW, Lundquist JD. Surface temperature lapse rates over complex terrain: Lessons from the Cascade Mountains. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**: D14122
- [18] 田杰, 王庆伟, 于大炮, 等. 长白山北坡气温的垂直变化. *干旱区资源与环境*, 2013, **27**(4): 65-69
- [19] Córdova M, Céleri R, Shellito CJ, et al. Near-surface air temperature lapse rate over complex terrain in the Southern Ecuadorian Andes: Implications for temperature mapping. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2016, **48**: 673-684
- [20] 周礼华, 黄力, 钱深华, 等. 金佛山西坡气温的垂直变化特征. *山地学报*, 2019, **37**(6): 818-827
- [21] 方精云. 我国气温直减率分布规律的研究. *科学通报*, 1992, **37**(9): 817-820
- [22] Pepin N, Benham D, Taylor K. Modeling lapse rates in the maritime uplands of northern England: Implications for climate change. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 1999, **31**: 151-164
- [23] Sullivan MJP, Lewis SL, Affum-Baffoe K, et al. Long-term thermal sensitivity of earth's tropical forests. *Science*, 2020, **368**: 869-874
- [24] Ameztegui A, Coll L. Unraveling the role of light and biotic interactions on seedling performance of four Pyrenean species along environmental gradients. *Forest Ecology and Management*, 2013, **303**: 25-34
- [25] Kaspar TC, Bland WL. Soil temperature and root growth. *Soil Science*, 1992, **154**: 290-299
- [26] 车宗玺, 李进军, 汪有奎, 等. 祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征. *生态学报*, 2018, **38**(1): 105-111
- [27] 高雅芳, 王雷, 杜海波, 等. 长白山苔原带土壤温度与肥力随海拔的变化特征. *冰川冻土*, 2018, **40**(4): 702-714
- [28] Liu X, Luo T. Spatiotemporal variability of soil temperature and moisture across two contrasting timberline ecotones in the Sergyemla Mountains, Southeast Tibet. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2018, **43**: 229-238
- [29] 刘信中. 江西官山自然保护区科学考察与研究. 北京: 中国林业出版社, 2005
- [30] Wild J, Kopecky M, Macek M, et al. Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, **268**: 40-47
- [31] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2022
- [32] Lembrechts JJ, van Den Hoogen J, Aalto J, et al. Global maps of soil temperature. *Global Change Biology*, 2022,

- 28: 3110–3144
- [33] 阎凌云. 农业气象. 北京: 中国农业出版社, 2001
- [34] Gheyret G, Mohammat A, Tang ZY. Elevational patterns of temperature and humidity in the middle Tianshan Mountain area in Central Asia. *Journal of Mountain Science*, 2020, **17**: 397–409
- [35] 郑成洋, 方精云. 福建黄岗山东南坡气温的垂直变化. *气象学报*, 2004, **62**(2): 251–255
- [36] Tang ZY, Fang JY. Temperature variation along the northern and southern slopes of Mt. Taibai, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **139**: 200–207
- [37] Wang GY, Zhao MF, Kang MY, *et al.* Diurnal and seasonal variation of the elevation gradient of air temperature in the northern flank of the western Qinling Mountain range, China. *Journal of Mountain Science*, 2017, **14**: 94–105
- [38] Khaliq I, Böhning-Gaese K, Prinzing R, *et al.* The influence of thermal tolerances on geographical ranges of endotherms. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, **26**: 650–668
- [39] Peters MK, Hemp A, Appelhans T, *et al.* Predictors of elevational biodiversity gradients change from single taxa to the multi-taxa community level. *Nature Communications*, 2016, **7**: 13736
- [40] Keenan TF, Gray J, Friedl MA, *et al.* Net carbon uptake has increased through warming-induced changes in temperate forest phenology. *Nature Climate Change*, 2014, **4**: 598–604

作者简介 王芳, 女, 1999年生, 硕士研究生。主要从事植被生态学研究。E-mail: camillewong540@163.com

责任编辑 杨弘
