

文章编号: 1008-2786-(2009)4-418-09

祁连山冷龙岭南坡小气候及植被分布特征

王建雷^{1,2}, 李英年^{1*}, 杜明远³, 王勤学⁴, 唐艳鸿⁴, 薛晓娟^{1,2}, 张法伟¹, 汪诗平¹

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3 日本农业环境技术研究所, 日本 筑波 3058604; 4 日本国立环境研究所, 日本 筑波 3050053)

摘 要: 在祁连山冷龙岭南坡 3 200 m 到 4 200 m 建立样带, 每 200 m 为梯度设置 7 个样地, 利用微气象自动观测仪观测气温和土壤温度, 同时调查样带植物群落、种类组成及地上生物量等。结果表明, 气温日变化幅度随海拔的升高而减小, 气温随海拔增加降低明显, 年平均气温直减率 0.51℃/100 m, 不同季节直减率有所不同。日平均气温稳定 $\geq 0^\circ\text{C}$ 、 $\geq 3^\circ\text{C}$ 和 $\geq 5^\circ\text{C}$ 的积温直减率几乎相同, 为 92℃/100 m, 持续天数直减率 9 d/100 m。土壤表层温度随海拔变化具有与气温相近的变化趋势。依植被景观及气候特点可将祁连山冷龙岭南坡分为亚高山高寒草甸、亚高山灌丛、高山草甸及高山冰雪稀疏植被气候带。观测植被区地上生物量表明, 植被地上年净初级生产力随海拔升高而降低。

关键词: 气温; 土壤温度; 海拔梯度; 气候带; 生产力
中图分类号: P463.22 **文献标识码:** A

光照、温度和水分构成了生物生存的基本气候环境, 他们影响着生物的生活习性以及生存发展, 不同的气候环境对应着不同的生物类型。研究者认为^[1], 气候变化体现了地形、地貌、植被和土壤等因素的综合作用, 这种作用反过来又影响土壤发育和植被生长。在山区, 由于垂直落差的原因, 气候环境将有所不同, 进而导致植被类型、植物种类组成以及植被生产力将发生显著的差异分布, 特别是范围较小但垂直落差大的区域植被类型千差万别, 咫尺迥然, 表现出山区气候资源的立体分布是植被不同布局的决定因素。山地不同高度土壤发育和植被生长既是气候的产物, 又是气候的指示^[2]。近期研究认为^[3], 全球变化中在高纬度及高海拔地区温度升高明显高于其他地区, 在高海拔地区气候温暖化更具有强的敏感性。同时研究证实^[4], 气候温暖化作用势必发生气候植被带的迁移, 植物群落结构、植物种

类组成及植被生产力发生变化。而山体垂直带自山顶到低海拔分布区表现出明显的增温效应, 恰好是研究气候变化植被类型变化以及增温状态下植被演替的天然实验平台, 也是研究不同高度土壤有机质(碳)和全氮等的分布状况及其影响因素的理想场地。

祁连山位于欧亚大陆中心, 地处青藏、蒙新、黄土三大高原交汇地带, 东西距离长, 高差悬殊, 是我国著名的高大山系之一。祁连山作为阻挡北方冷空气南下的高大屏障, 南北两侧具有明显不同的气候特征, 山地气候垂直差异显著。植被分布呈现出亚洲中部蒙古成分, 北温带成分, 温带亚洲成分以及特有成分, 组成了山地森林、灌丛、草原、草甸等不同的植被类型, 而且南北两坡的分布高度、分布类型也明显不同。本文基于祁连山南坡坡地自 3 200 m 到 4 300 m 不同海拔的山体垂直带样地, 主要观测分

收稿日期 (Received date): 2008-09-11; 改回日期 (Accepted): 2009-02-20.

基金项目 (Foundation item): 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-06-01); 国家科技部支撑项目 (2006BAC08B02); 中科院西北高原生物研究所百人计划项目。[The CASA Action-Plan for West Development (KZCX2-XB2-06-01); National Key Technology R & D Program (2006BAC08B02); Supported by Knowledge Innovation Project of The Chinese Academy of Sciences (KZCX2-YW-432-1); hundred talent program of Northwest Plateau Institution of Biology Chinese Academy of Sciences]

作者简介 (Biography): 王建雷 (1984-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 从事植物生态学研究。[Wang Jianlei male born in Taian Shandong Province in 1984, Graduate student, mainly engage in the research of plant ecology]

通讯作者 (Author for correspondence): 李英年 [Li Yingnian], E-mail: ynli@nwni.ac.cn

析了祁连山南坡温度(气温、土壤温度)随高度变化的有关特征,以及山体垂直带植被分布及地上年净初级生产量。以更深层了解从山顶到低海拔(气温增加过程)区域有关植被(群落结构、物种组成、植被类型、净初级生产力、植被 C/N 等)、土壤(容重、有机质、有机碳、CO₂ 排放速率、土壤氮等)要素变化状况,为探讨高寒草地植被对气候变化适应与响应的研究提供科学依据。

1 自然概况及研究资料

1.1 自然概况

研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)进行。区域地处青藏高原东北隅的祁连山北支冷龙岭东段南坡坡地的大通河河谷。该地区位于亚洲大陆腹地,具明显的高原大陆性气候,东南季风及西南季风微弱。高海拔条件制约,气温极低,无明显四季之分,仅有冷暖二季之别,干湿季分明;降水分配不均匀主要集中于暖季的 5~9 月,占年降水量的 80%,冷季 10 月~翌年 4 月仅为年降水量的 20%。年内无霜期极短,在最热的 7 月仍可出现霜冻、结冰、降雪(雨夹雪)等冬季所能有的天气现象。表现出冷季寒冷、干燥、漫长,暖季凉爽、湿润、短暂^[5]。

1.2 研究资料与处理

1.2.1 植被与土壤数据

考虑到山地景观和海拔,自海北站(3 200 m)开始,向东延伸至冷龙岭山顶(4 300 m)不同部位以海拔每间隔 200 m 为标准(4 300 m 例外),设置 7 个 8 m × 20 m 样地,调查了包括植物种类组成、植物平均高度、地上生物量、土壤有机质等植被和土壤特征参数,同时对人类活动及其生态景观进行记录。

1.2.2 气象资料

在上述不同海拔的 7 个样地观测了 1.5 m 高度空气温湿度,土壤 0.1 m、0.2 m、0.5 m 温湿度。其中 3 200 m 和 3 400 m 沿用海北站微气象-涡度相关法观测通量塔数据,其他不同海拔架设了简易微气象自动观测仪(HFT-3, CSI USA),数据为每半小时输出数据,全年观测。在 3 200 m 处自 1980 年以来有海北站的人工气象观测数据,微气象-涡度相关法观测系统分别于 2001-08 和 2002-09 架设在 3 200 m 和冷龙岭南坡缓坡地 3 400 m 处,另 4 套微气象观测仪于 2006-07 架设。文中采用了到 2007

年度的观测数据。

2 结果与分析

2.1 气温随海拔的变化

2.1.1 不同高度气温的日变化

为探讨气温的日变化特征,这里仅给出了 2007-01-02 不同海拔高度地上 1.5 m 处气温 24 h 的变化情况(图 1)。可以看到,日间不同高度气温的日变化,均表现为单峰型,具有早晚低,午后高的特点。日平均气温为低海拔高于高海拔,同时海拔越低气温变化的幅度越大,海拔升高气温变化幅度逐渐减小,即日较差随海拔的升高逐渐降低。在海拔 3 200 m 处日平均气温变化最大,日最低气温 -24.2℃,日最高气温 -3.6℃,日较差达到 20.6℃,而海拔 4 300 m 处日最低气温 -17.4℃,最高气温 -12.9℃,日较差仅为 4.5℃。气温日较差的这种分布主要受逆温层影响所制。研究证实^[6]逆温最高处出现在山坡中上部,最低气温值出现在坡底,这就导致了 3 600 m 和 3 800 m 处在冬季气温偏高,而 3 200 m 处气温较低。在夏季,气温日较差同样随海拔升高而下降,只是下降的幅度有所减小。

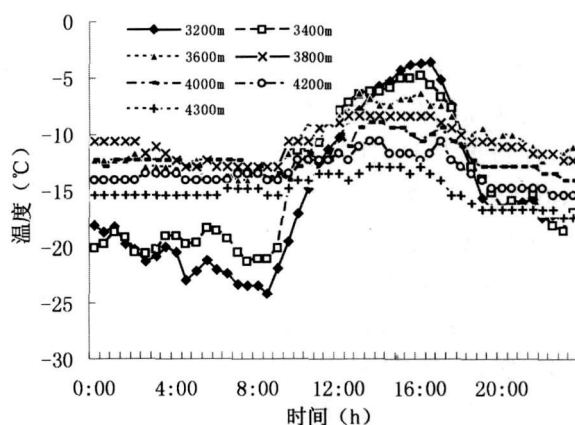


图 1 祁连山冷龙岭南坡不同海拔的气温日变化

Fig 1 Change of daily temperature along altitude on the Southern Lenglongling Qilian mountains

2.1.2 不同海拔气温年变化及沿山体分布状况

表 1 给出了不同海拔气温的年变化。不同海拔气温具有相同的变化规律,即在 1 月低,8 月高。但因高度不同地表面受热等不同,月平均气温差异显著。需要说明的是海北站多年观测表明月平均气温最高在 7 月,1 月最低,但受云系分布、降水及大气

环流影响, 2007年月平均气温在 8月高。3 200 m、3 400 m、3 600 m、3 800 m、4 000 m、4 200 m和山顶 4 300 m处年平均气温分别为 - 0.4℃、- 0.6℃、- 0.8℃、- 1.6℃、- 3.1℃、- 4.3℃和 - 6.1℃, 从海拔 3 200 m到 4 300 m年平均气温下降 5.7℃, 其年平均气温递减率为 0.51℃ /100 m。

不同季节, 逆温层强度不同导致了气温直减率并不相同。统计海北站气象资料表明^[7], 冬季 12~翌年 2月大气层结稳定, 期间风速较小, 逆温层最为强盛, 气温直减率最低, 3个月的平均值为 0.24℃ /

100 m; 3~ 6月冬去春来, 下垫面受热迅速, 季节冻土开始融化, 山体较高部分的冰雪融化过程中需吸收大量的热量, 较高地区气温回升较慢, 而海拔相对较低区域气温回升明显, 导致这 4个月的气温直减率最高, 平均为 0.68℃ /100 m; 7~ 11月, 季节冻土完全融化, 大气层结极不稳定, 常发生强对流天气, 大气平流及对流作用明显, 逆温层相对较弱, 随海拔升高气温直减率介于上述之间, 5个月平均为 0.54℃ /100 m(表 1)。

表 1 祁连山东段南坡坡地不同海拔气温年变化

Table 1 Changes of annual air temperature along altitude on the Southern Lenglongling Qilian mountains

海拔 (m)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均 (℃)
3 200	- 14.6	- 9.5	- 4.2	0.3	6.6	8.1	10.1	10.9	6.0	0.4	- 6.9	- 12.3	- 0.4
3 400	- 13.4	- 9.5	- 4.1	- 1.0	5.3	6.6	8.9	10.3	5.6	0.0	- 6.0	- 10.5	- 0.7
3 600	- 12.7	- 7.8	- 5.0	- 1.8	4.9	6.0	8.6	9.3	4.9	- 1.2	- 5.2	- 9.6	- 0.8
3 800	- 12.8	- 8.1	- 5.8	- 2.8	3.9	5.1	7.6	8.3	3.6	- 2.3	- 6.8	- 9.5	- 1.6
4 000	- 14.4	- 9.7	- 7.4	- 4.4	2.4	3.6	6.2	7.1	2.7	- 4.2	- 8.2	- 10.3	- 3.1
4 200	- 15.8	- 11.3	- 9.1	- 6.1	0.8	2.8	6.1	6.3	1.3	- 5.7	- 9.5	- 11.8	- 4.3
4 300	- 17.5	- 13.0	- 10.8	- 8.0	- 1.2	0.8	5.4	4.4	- 0.6	- 6.7	- 11.8	- 14.8	- 6.2
直减率 (℃ /100m)	0.26	0.32	0.60	0.75	0.71	0.67	0.42	0.59	0.60	0.64	0.44	0.15	0.51

不同月份气温随海拔变化的趋势也不尽相同, 以气温最高的 8月和气温最低的 1月为例, 由图 2 可以看到, 8月气温 (T_8)与海拔 (H)呈明显的线性负相关关系 ($T_8 = - 1.05H + 12.319$, $R^2 = 0.9836$); 而 1月气温 (T_1)随海拔的变化呈现一定的非线性关系 ($T_1 = - 0.3334H^2 + 2.130H - 16.321$, $R^2 = 0.9747$)。表明不同季节受逆温层强弱不同影响, 自 3 200 m开始随海拔升高气温降低形式有所不同。8月平均气温随海拔增加直线下降; 1月平均气温自 3 200 m开始逐渐升高, 3 800 m达到最高, 尔后随海拔进一步升高而逐渐下降。其中 1月平均气温自 3 200 m到 4 300 m下降 2.9℃, 平均气温递减率为 0.26℃ /100 m; 8月自 3 200 m到 4 300 m月平均气温下降 5.5℃, 气温递减率为 0.59℃ /100 m。这些说明不论是冬季还是夏季以及年平均气温递减表现出与海拔增高具有极显著的负相关关系。

2. 1. 3 不同海拔高度日平均气温稳定通过 $\geq 0^\circ\text{C}$ 、 $\geq 3^\circ\text{C}$ 、 $\geq 5^\circ\text{C}$ 积温及持续天数

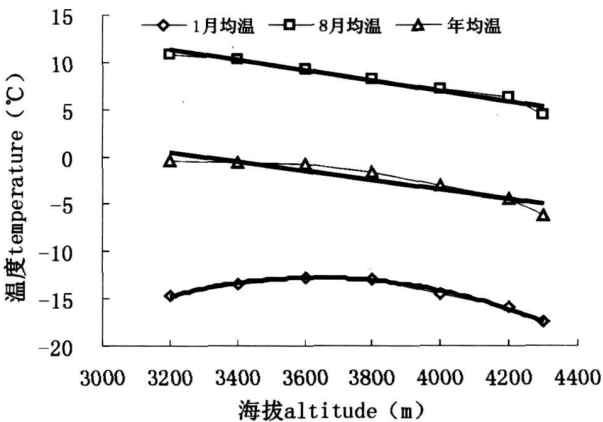


图 2 祁连山冷龙岭南坡坡地年平均、1月和 8月平均气温沿海拔高度的变化

Fig 2 Changes of annual average temperature, air temperature in January and August along altitude on the Southern Lenglongling Qilian mountains

在高寒草甸分布区, 受高海拔因素影响气温低, 就是在最热月, 月平均气温在 10℃左右, 与之联系的日平均气温稳定 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的出现天数很短, 甚至不出现。根据海北站 (3 200 m)多年观测表明^[11], 日

平均气温稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的出现天数小于 10 d 积温不足 $100^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。由于日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 分别对应着高寒草甸植物萌动发芽、返青、强度生长各阶段^[8,9]。在此分析了山体不同高度上日

平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 各界限温度的积温及持续天数的变化特征。统计 2007 年 7 个不同海拔日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 各界限温度的积温及持续天数见表 2。

表 2 日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 各界限温度的积温及持续天数
Table 2 The accumulative temperature and constant days for the daily average air temperature $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$

海拔 (m)	积温 ($^{\circ}\text{C}$)			维持天数 (d)		
	$\geq 0^{\circ}\text{C}$	$\geq 3^{\circ}\text{C}$	$\geq 5^{\circ}\text{C}$	$\geq 0^{\circ}\text{C}$	$\geq 3^{\circ}\text{C}$	$\geq 5^{\circ}\text{C}$
3 200	1 387.3	1 349.5	1 269.9	191	164	144
3 400	1 202.1	1 162.0	1 058.4	183	154	129
3 600	1 093.6	1 050.8	928.7	173	145	114
3 800	921.1	849.2	742.4	163	123	97
4 000	718.6	650.2	503.6	150	107	70
4 200	588.0	519.4	410.4	133	86	59
4 300	403.2	352.3	222.7	99	65	33

表 2 看到, 2007 年日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 在 3 200 m 处的持续天数 191 d 积温 $1\,387.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 而到 4 300 m 处只有 99 d 积温 $430.2^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 日均温 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 在 3 200 m 处持续天数为 164 d 积温 $1\,349.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 到 4 300 m 处为 65 d 积温 $352.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 日均温 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的持续天数由 3 200 m 处的 144 d 到 4 300 m 处下降到 33 d 其积温由 $1\,269.9^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 对应下下降到 $222.7^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。总体来讲日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 各界限温度的积温及持续天数均随海拔的升高而降低(减少), 具有极显著的负相关关系。有效积温的持续天数为海拔每升高 100 m, 日期平均减少 9 d 左右。积温随海拔升高, 各界限温度的

积温直减率基本相近, 均约 $92^{\circ}\text{C} / \text{m}$ 。

2.2 土壤温度的变化
2.2.1 不同海拔土壤温度的日变化

图 3 分别给出了 2007-07-01 的 3 200 m、3 400 m、3 600 m、4 000 m、4 200 m 及 4 300 m (3 800 m 缺失) 6 个点 10 cm 和 20 cm 地温日变化。可以看到, 在高海拔地区 10 cm 土壤温度日最低值出现在 7:00~8:00 之间, 最高值出现在 18:00 左右, 而在海拔较低地区日最低值出现时间在 9:00 左右, 最高值出现时间在 21:00 左右; 20 cm 土壤温度也表现相同的日变化规律, 但日最低和最高出现时间比 10 cm 滞后明显, 变化幅度显著降低。10 cm 和

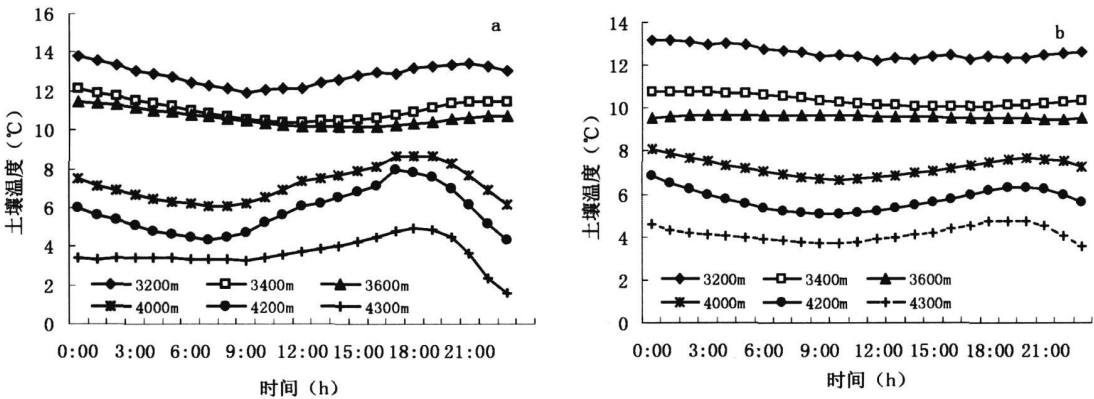


图 3 祁连山冷龙岭南坡坡地不同海拔 10 cm (a)、20 cm (b) 土壤温度日变化
Fig. 3 Changes of daily soil temperature along the different altitude at 10 cm depth (a) and 20 cm depth (b) on the Southern Lenglongling, Qilian mountains

20 cm的土壤温度日最高(低)值相对气温的日最高和最低值出现时间其滞后性更显著,且低海拔区滞后性明显于高海拔区,深层地温明显于浅层地温。同时土壤温度日变化随海拔增加幅度加大,同一高度上深层地温日变化较浅层平稳。冬季受到逆温及积雪等因素的影响,地温日变化(图略)相对较弱,而且随海拔的变化不甚明显,但总体来讲地温是随海拔的升高而降低。

2.2.2 土壤温度的年变化及随海拔的变化

图4给出了10 cm、20 cm、50 cm年平均土壤温度随海拔的变化。土壤温度呈现出随海拔升高而降低的趋势,10 cm、20 cm和50 cm土壤温度(T_s)与不同海拔(H)均具有显著的线性负相关:(10 cm: $T_s = -1.407H + 5.7259$, $R^2 = 0.889$; 20 cm: $T_s = -1.357H + 5.6963$, $R^2 = 0.937$; 50 cm: $T_s = -1.2714H + 5.3597$, $R^2 = 0.928$)。可以看到,3个层次年平均土壤温度随海拔高度的变化基本相近,但在不同高度,土壤温度随土壤深度变化将有一定的差异。在海拔相对较低的3200 m,上层年平均土壤温度高于底层50 cm,在山顶的4300 m处,底层50 cm的土壤温度高于浅层10 cm。在3600 m处10~50 cm土壤年平均温度基本相同。

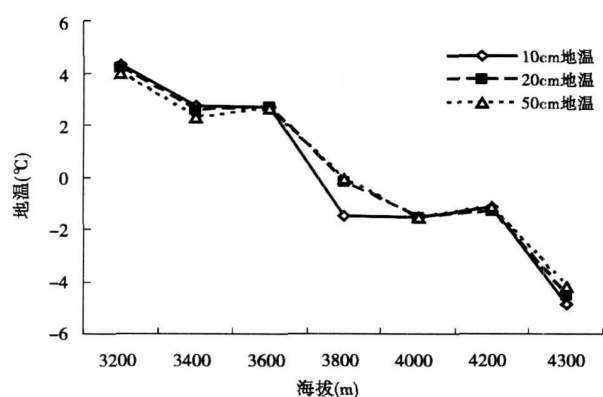


图4 祁连山冷龙岭南坡坡地不同海拔地温年变化

Fig. 4 Change of annual earth temperature along altitude on the Southern Lenglongling Qilian mountains

依照常理,不同高度土壤温度在随海拔变化过程中均应在准相关直线附近,但图4看到,在3600 m和4200 m处土壤温度偏差明显,均相对较高。造成这种现象的主要原因是3600 m处是逆温层中部,受逆温层影响该高度温度相对较高,特别是较深层土壤不仅受逆温层的影响,同时也受到土壤对低温的“过滤”,使土壤温度始终保持相对较高。4200

m处所架设的微气象仪在较陡峭的山坡,坡向也略有偏差,坡向与坡度将导致区域吸收较强的太阳辐射,进而有利4200 m土壤温度的相对提高。另外,地表植被的发育^[10]和土壤结构及湿度也是影响研究地区土壤温度变化的主要原因,在海拔较低地区植被发育良好,土壤层深厚,土壤湿度大,一定范围内土壤温度的变化与海拔的关系不明显,但在高海拔地区,土层极为浅薄,甚至为裸露石岩,土壤下渗水明显,土层(裸岩内部)干燥,导致土壤温度变化幅度明显。除此之外,冬季高海拔地区的长久积雪也是重要的影响因素^[11],积雪可增大地表的反射率,减少辐射能的吸收,致使雪面温度比气温低,同时积雪是热的不良导体,导热率低,冬季可以防止土壤热量散失,使土壤温度高于气温,起到明显的保温作用。但是当气温上升到零度以上时,地面的残雪则阻滞土壤增温,减弱冬季的保温作用。所以3600 m处地温升高,很大程度上和逆温作用有关,而在4200 m处则与雪层的保温作用有关,在4300 m处的山顶由于吹风使得积雪层减少,上述因素的影响作用明显减弱了,增温不显著。

2.3 气温与地温的关系

毫无疑问,区域气温的变化直接影响到地表地温的变化,自3200 m到4300 m的7个层次年平均土壤温度(T_s)与气温(T_m)具有显著的正相关关系(图5 10 cm: $T_s = 1.2208T_m + 0.8506$, $R^2 = 0.935$; 20 cm: $T_s = 1.0872T_m + 1.0668$, $R^2 = 0.936$; 50 cm: $T_s = 1.2208T_m + 0.8506$, $R^2 = 0.935$)。表现出土壤温度随海拔的升高气温降低而降低,而且土壤表层降低比深层更为明显。

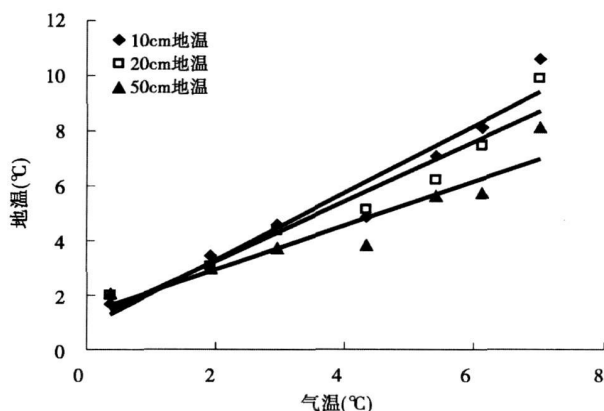


图5 土壤温度与气温的关系

Fig. 5 The relationship between soil temperature and air temperature

2.4 山体垂直带植被分布及地上年净初级生产力

2.4.1 山体植被分布及与气候间的关系

植物地理学指出, 气候是决定陆地植被类型分布格局及其结构功能特性的最主要因素^[12], 很多学者将温度作为一个重要的参数去描述植被的地理分布与气候之间的关系。在青藏高原受温度及降水的影响植被不仅具有水平分布规律, 而且受地形作用下的垂直气候差异, 特别是温度差异的影响其植被垂直分布明显。有研究表明^[13] 高寒草甸地区降水量可基本满足牧草发育的要求, 温度成为主要的限制因子。本实验研究区的祁连山冷龙岭南坡虽然在东西 9 km 的范围, 但垂直落差大, 气候差异悬殊, 形成明显的垂直带分异, 热量、养分和水分条件构成植物生境特征显著不同。自 3 200 m 的海北站开始, 至山顶 4 300 m 的区域, 降水可能略有差异 (本实验未作), 但区域降水相对丰富, 植被生长主要受制于温度的影响, 而且温度随海拔变化剧烈, 致使植被类型、群落结构相差明显。这里采用积温以及年、最热 (冷) 月平均气温等作指标, 可将祁连山冷龙岭南坡实验区 3 200~4 200 m 划分为下列 4 个垂直气候带。

1. 亚高山高寒草甸气候带: 位于海拔 3 100 m ~ 3 300 m。为典型的高寒矮蒿草草甸植被类型, 植被盖度高, 生物多样性丰富, 植被主要优势种为矮蒿草 (*Kobresia humilis*)、异针茅 (*Stipa aliena*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、早熟禾 (*Poa annua*)、次优势种有蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)、鹅绒萎陵菜 (*Potentilla anserina*)、棘豆 (*Oxytropis glabra*)、花苜蓿 (*Trigonella nuttalliana*)、异叶米口袋 (*G. multiflora bunge*)、麻花艽 (*Gentiana straminea*)、伴生种有高山唐松草 (*Thalictrum alpinum*)、苔草 (*Carex dispalata*)、美丽风毛菊 (*Saussurea superba*)、兰石草 (*Lancea tibetica*)、长叶火绒草 (*Leontopodium longifolium*)、线叶龙胆 (*Gentiana farreri*) 等, 隶属 19 科 40 属 54 种植物。部分地带分布藏蒿草沼泽化草甸。冬冷夏凉, 半湿润气候, 最热月 7 月气温在 9~11℃, 最冷月 1 月为 -13℃~-16.0℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 $100^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 左右, 维持天数约 10 d, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温维持在 $1\,400^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 以内, 无霜期 20~40 d 植物生长期有 135 d。

2. 亚高山灌丛草甸气候带: 山前冲洪积扇、缓坡地段, 分布在海拔 3 250~3 450 m, 为金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 灌丛草甸, 主要优势种除金露梅外,

还有垂穗披碱草、异针茅、苔草、早熟禾、瑞苓草 (*Saussurea nigrescens*)、次优势种为珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*)、黄帚橐吾 (*Ligular virgaurea*)、羊茅 (*Festuca ovina*)、洽草 (*Koeleria cristata* L.)、矮蒿草、柔软紫菀 (*A. flaccidus bunge*)、蒲公英, 伴生种为老鹳草 (*Geranium sibiricum*)、长叶火绒草、银莲花 (*Anemone obtusiloba*.)、高山唐松草、兰石草、尖叶龙胆 (*Gentiana aristata*)、鹅绒萎陵菜等, 隶属 15 科 37 属 47 种植物。气候寒冷, 最热月平均气温 7~10℃, 最冷月在 -14~-17℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温不出现, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温维持在 $1\,000^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 左右, 全年几乎有霜出现, 风力较大, 植物生长期 118 d 左右。

3. 高山草甸气候带: 坡麓地带, 海拔在 3 450~3 900 m, 为高山草甸, 群落主要优势种为苔草、矮蒿草、异针茅, 次优势种为小蒿草、垂穗披碱草、高山唐蒿草、雪白萎陵菜 (*Potentilla nivea*)、珠芽蓼、齿状风毛菊 (*Saussurea katochaete*)、金露梅、矮火绒草 (*Leontopodium nanum*)、美丽风毛菊, 伴生种为蒲公英、兰石草、线叶龙胆、银莲花、棘豆等, 隶属 12 科 24 属 31 种植物。气候寒冷, 最热月平均气温 5~8℃, 最冷月在 -15℃左右, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温维持在 $1\,100^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 左右, 风力大, 植物生长期 100 d 左右。

4. 高山亚冰雪稀疏植被气候带: 3 900 m 以上至山顶 4 300 m, 多为裸露险峰石岩或雪线, 呈现石质荒漠景象。主要生长稀疏垫状植被, 如苔藓状蚤缀 (*Arenaria musciformis*)、垫状繁缕 (*Stellaria decumbens*) 等。其中海拔 4 100 m 以上, 裸石, 没有植被, 偶见水母雪莲。全年严寒, 年均温在 -3℃以下, 最热月在 6℃以下, 最冷月在 -17℃以下, 日平均稳定 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温不足 $400^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 风力强劲, 植物生长期不足 80 d。

2.4.2 植被生产力随海拔高度的变化

高寒草甸植物一般从日平均气温稳定 $\geq 0^\circ\text{C}$ 开始返青, 干物质开始积累, 随温度升高, 降水增加, 生物量增大, 在日均气温 $\geq 5^\circ\text{C}$ 结束时达最大^[14]。观测有植被的 3 200~3 800 m 地上生物量发现 (图 6), 随海拔升高地上净初级生产力呈现下降趋势。植被地上净初级生物量沿海拔每升高 100 m 将减少 43.47 g/m², 与海拔具有极显著的相关性 ($R = 0.964$ $P < 0.05$)。

一般来说, 影响草地生产力的因素主要有自然因素和人为因素。气候对于初级生产力的影响中温度也是主要的限制因子, 由于海拔的不同, 导致区域

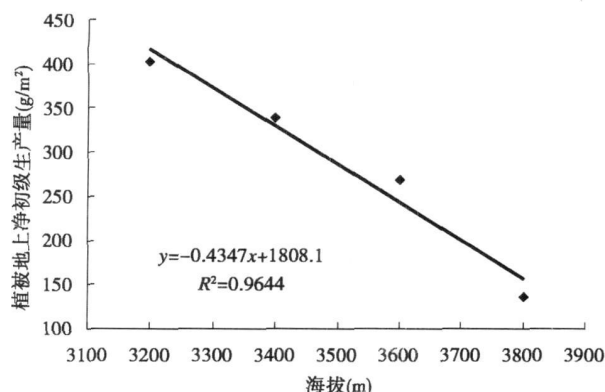


图 6 祁连山冷龙岭南坡坡地植被地上净初级生产量随海拔高度的变化

Fig. 6 Changes of soil organic matter and nitrogen with altitude on the Southern Lenglongling Qilian mountains

温度条件差异悬殊,植物的有效积温时间相差很大,生长时间长短差异明显,致使海拔较低的地区植物生长时间较长,生长比较旺盛,植被生产力高,而海拔较高区域植被生产力低。在高海拔地区的祁连山南坡是当地夏季放牧草场,其植被生产力不仅受到自然因素(海拔,温度,降水等)的影响,同时由于是夏季牧场,放牧强度大,植被负载能力过大,导致区域草场退化严重。虽然于 2006 年开始选择不同高度进行样地的封育措施,但是重度放牧影响的延续及滞后性,导致过去进行放牧的草地(一般在 3 500 m 以上)地上生产力较低。同时由于山体垂直带不同高度日均气温 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 结束时间自高海拔向低海拔逐渐延迟,从而其生物量最大值出现时间自 8 月底开始向后延,滩地生物量最大值出现时间可推迟到 9 月中旬初。

3 讨论与结论

对于气候垂直带和植被垂直分布的研究由来已久,但由于山体所处地理位置和山体的高度、坡向、形态以及距海洋的远近等不同,各种研究都有一定的针对性,其气象要素之间的变化亦明显不同。在纬度和海拔较低地区,一般来说气温高且随高度变化差异小。郑成洋和方精云^[1]对于福建黄岗山东南坡气温的垂直变化研究表明,年平均气温直减率为 $0.43^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,与我们所取的研究点一样气温直减率均表现相同变化规律,但远低于祁连山冷龙岭南坡的 $0.51^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,且不同季节之间气温直减率差异明显,黄岗山东南坡一般夏秋两季气温直减率

较大,冬季气温直减率较小,而对于祁连山冷龙岭南坡的研究则表明在冰雪融化的 3~6 月,由于下垫面对热量吸收的差距,导致气温直减率较高。张虎等^[15]对祁连山北坡中部的气候特征以及垂直气候带研究表明,气温直减率为 $0.58^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,这明显高于祁连山冷龙岭南坡的气温直减率,主要的原因是研究区的海拔以及坡向问题,由于南北两个坡向受到太阳辐射的存在着极大的差距,尤其是在高海拔地区的北坡光照辐射增温作用比较明显所致。福建黄岗山东南坡积温直减率约为 $185^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,远远高于了祁连山冷龙岭南坡的 $92^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,主要原因是祁连山地常年温度较低,形成有效积温的时间较短,有效积温总量较低,所以积温的变化较小。地温的研究中同一海拔不同层次之间的梯度变化^[16]具有上层升温快、降温也快,深层升温慢,降温也慢的特点。单一层次地温随海拔梯度的升高,都有一定的下降的趋势^[15],尤其是在夏季比较明显。祁连山冷龙岭南坡不同层次以及不同海拔梯度的地温变化与以上的研究结果比较接近。而且地温与气温之间的分析结果与较多地区具有一致性^[17,18],表现为一种线性的回归关系,只是回归系数略有差异,但均有极显著的相关性。我们对祁连山南麓的坡地小气候研究表明:

1. 祁连山冷龙岭南坡不同高度气温的日变化相同,均为单峰型,随海拔升高日均气温及日较差降低。年平均气温随着海拔的升高直减率为 $0.51^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,而且不同季节受逆温层强度影响不同气温直减率有所不同,3~6 月直减率最大(4 月最大,为 $0.75^{\circ}\text{C}/100\text{m}$);寒冷的冬季最小(12 月仅为 $0.15^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)。

2. 日平均气温稳定 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温及持续天数沿海拔增高呈极显著的线性负相关关系。不同界限温度积温和持续天数直减率几乎相同,积温约为 $92^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,持续天数为 $9\text{d}/100\text{m}$ 。

3. 土壤温度尤其是夏季土壤温度的日变化趋势和空气温度的变化趋势相近,均为一高一低的单峰型,越深层的土壤温度越为稳定,同时土壤温度的变化受辐射影响明显。不同海拔的土壤温度同样是随着高度的升高而明显下降,但是土壤温度在冬季会出现比较明显的不稳定性,主要是受到逆温作用以及降雪的影响。

4. 祁连山南坡坡地的 3 200~4 300 m 间,山体气候带依次可分为亚高山高寒草甸、亚高山灌丛草

甸、高山草甸、高山亚冰雪稀疏植被等 4 个气候带, 对应植被主要为矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸、高山杂类草甸、稀疏垫状植被, 其中海拔 4 100 m 以上, 裸石, 没有植被, 偶见水母雪莲。植物的种类从低海拔到高海拔依次减少。

5. 生产力随着海拔的升高逐渐降低, 年最高出现在 8 月底或 9 月初, 且海拔越高出现时间将提早。

参考文献 (References)

- [1] Zheng Chengyang, Fang Jingyun. Change in air temperature variables along altitudinal gradient in Mt Huanggang, China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 251~254 [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): 251~254]
- [2] Gu Wei, Li Ning. Studies of mountane climatic vertical zones of temperature arid and semi-arid China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1994, 8(3): 1~11 [顾卫, 李宁. 中国温带干旱、半干旱区山地气候垂直带谱研究 [J]. 干旱区资源与环境, 1994, 8(3): 1~11]
- [3] Liu Xiaodong, Hou Ping. Relationship between the climatic warming over the Qinghai-Xizang plateau and its surrounding areas in recent 30 years and the elevation [J]. *Plateau Meteorology*, 1998, 17(3): 245~249 [刘晓东, 侯萍. 青藏高原及其临近地区近 30 年气候变暖与海拔高度的关系 [J]. 高原气象, 1998, 17(3): 245~249]
- [4] Zhong Yongde, Li Mahe, Norbert Krauchi. Global warming facilitates plant migration and biological invasion [J]. *Geographical Research*, 2004, 23(3): 347~356 [钟永德, 李迈和, Norbert K. 全球暖化促进植物迁移与入侵 [J]. 地理研究, 2004, 23(3): 347~356]
- [5] Li Yingnian, Shi Shengbo, Cao Guangmin, et al. The observational studies on characteristics of microclimate in Haibei alpine meadow regions of Qilian mountain [J]. *Plateau Meteorology*, 2000, 19(4): 512~519 [李英年, 师生波, 曹广民, 等. 祁连山海拔高寒草甸地区微气候特征的观测研究 [J]. 高原气象, 2000, 19(4): 512~519]
- [6] Zhang Hui, Cai Weihua, Zhang Weiguang, et al. Analysis of the trend of temperature inversion by hill slopes [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(4): 22~25 [张辉, 蔡文华, 张伟光, 等. 低丘陵山坡地逆温趋势分析 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 22~25]
- [7] Li Yingnian, Zhao Xinquan, Cao Guangmin, et al. Analyses on climates and vegetation productivity background at Haibei alpine meadow ecosystem research station [J]. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(4): 558~567 [李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海拔高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析 [J]. 高原气象, 2004, 23(4): 558~567]
- [8] Li Yingnian, Guan Dingguo, Zhao Liang, et al. Seasonal frozen soil and its effect on vegetation production in Haibei Alpine Meadow [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(3): 311~319 [李英年, 关定国, 赵亮, 等. 海拔高寒草甸的季节冻土及在植被生产力形成过程中的作用 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 311~319]
- [9] Li Yingnian, Wang Qinxue, Gu Song, et al. Integrated monitoring of alpine vegetation types and its primary production [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 40~48 [李英年, 王勤学, 古松, 等. 高寒植被类型及其植物生产力的监测 [J]. 地理学报, 2004, 59(1): 40~48]
- [10] Guo Yuliang. Characteristics of earth temperature and impact factors of permafrost regions along with Qinghai-Tibet railway [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2007, 33(1): 61~64 [郭余良. 青藏铁路多年冻土区的地温特征及影响因素 [J]. 铁路勘察, 2007, 33(1): 61~64]
- [11] Gao Rong, Wei Zhigang, Dong Wenjie. Analysis of the cause of the differential interannual variation between snow cover and seasonal frozen soil in the Tibetan plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(2): 153~159 [高荣, 韦志刚, 董文杰. 青藏高原冬春积雪和季节冻土年际变化差异的成因分析 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(2): 153~159]
- [12] Song Yongchang. *Vegetation Ecology* [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2001 [宋永昌. 植被生态学 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001]
- [13] Li Yingnian, Zhou Huakun, Shen Zhenxi. The association analysis of herbage yield and meteorological factors in alpine meadow [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2001, 9(3): 232~238 [李英年, 周华坤, 沈振西. 高寒草甸牧草产量形成过程及与气象因子的关联分析 [J]. 草地学报, 2001, 9(3): 232~238]
- [14] Wang Changting, Wang Qijun, Long Ruijun, et al. Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an alpine meadow [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(2): 240~245 [王长庭, 王启基, 龙瑞军, 等. 高寒草甸群落植物多样性和初级生产力沿海拔梯度变化的研究 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 240~245]
- [15] Zhang Hu, Wen Yali. The climate features and regionalization of vertical climatic zones in the northern slope of Qilian Mountains [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 12(6): 497~502 [张虎, 温莉亚. 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, 12(6): 497~502]
- [16] Zhang Hezhen, Tang Xiaoping. Development characteristic of the shallow layer of ground temperature in basin of Braaputra River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 8(55~58) [张核真, 唐小萍. 雅鲁藏布江流域浅层地温演变特征 [J]. 高原气象, 2008, 8(55~58)]
- [17] Feng Xuemin, Cai Deli. Soil temperature in relation to air temperature, altitude and latitude [J]. *ACTA Palobiologica Sinica*, 2004, 5(41): 489~491 [冯学民, 蔡德利. 土壤温度与气温及纬度和海拔关系的研究 [J]. 土壤学报, 2004, 5(41): 489~491]
- [18] Apar Erkejan, Feng Junping. Analysis on the relation between soil temperature and air temperature of Changji City [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2007, 6(1): 53~56 [阿帕尔, 叶尔克江, 冯俊平. 昌吉市地温与气温关系初探 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 6(1): 53~56]

The Features of Microclimate and Vegetation Distribution on the Southern Lenglonglin, Qilian Mountains

WANG Janlei^{1,2}, LI Yingnian¹, DU Mingyuan³, WANG Qinxue⁴, TANG Yanhong⁴,
XUE Xiaojian^{1,2}, ZHANG Fawei¹, WANG Shiping¹

(1 Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China;

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 National Institute for Agro-Environmental Science, Tsukuba 3058604, Japan;

4 National Institute of Agro-environmental Sciences, Tsukuba 3058604, Japan.)

Abstract Based on microclimatic auto observation systems, the air and soil temperature were measured at 30 minutes intervals in seven equidistant plots from 3 200 meters to 4 200 meters on the southern slope of Lenglonglin, Qilian Mountains. Meanwhile, the plant community of the plot was investigated, such as species composition, average height and aboveground biomass. The results showed that the fluctuation of diurnal air temperature and the temperature decreased obviously along with the ascension of altitude. The decline rate of the annual average temperature was $0.51^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, and that of different seasons was variational somewhat. The accumulative temperature for $\geq 0^{\circ}\text{C}$, $\geq 3^{\circ}\text{C}$ and $\geq 5^{\circ}\text{C}$ had almost the same decline rate which was $92^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. The decline rate of the lasting days was $9\text{ d}/100\text{ m}$. The soil surface temperature and air temperature had the similar trend. Accord with vegetation landscape and climate characteristics, we divided the plant community in the southern slope of Lenglonglin, Qilian Mountains into sub-alpine meadow climatic zone, sub-alpine shrub-meadow climatic zone, alpine meadow, alpine sub-snow ice sparse vegetation climatic zone. The aboveground biomass of vegetation zones showed that aboveground annual net primary productivity decreased with the ascension of altitude.

Key words air temperature; soil temperature; elevation; climatic zone; productivity