

引用格式:赵广东,陈健,史作民,杨洪国,许格希.川西亚高山暗针叶林土壤温度和水分动态及其与气象因子的关系[J].山地学报,2021,39(2):183-193.

ZHAO Guangdong, CHEN Jian, SHI Zuomin, YANG Hongguo, XU Gexi. Soil temperature and moisture dynamics and their relationship with meteorological factors of subalpine dark coniferous forest in Western Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(2):183-193.

川西亚高山暗针叶林土壤温度和水分动态 及其与气象因子的关系

赵广东^{1,2}, 陈健^{1,2}, 史作民^{1,2,3*}, 杨洪国⁴, 许格希^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 四川米亚罗森林生态系统定位观测研究站, 四川 理县 623100; 3. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 4. 中国林业科学研究院 湿地研究所, 北京 100091)

摘要: 暗针叶林是川西亚高山林区的主要森林类型,但目前亚高山暗针叶林气象因子与土壤温度、水分的相关性及其对土壤温度、水分的影响程度尚不清晰。本文运用 Pearson 相关分析和随机森林模型,分析了 2019 年川西亚高山暗针叶林土壤温度和体积含水量的动态变化特征及其与气象因子的关系,探讨了气象因子对土壤温度、土壤体积含水量的影响大小。结果表明:(1)5、20 和 40 cm 深度处的土壤平均温度分别为 3.97℃、3.82℃和 3.80℃,土壤平均体积含水量分别为 18.74%、25.08%和 12.82%。三个深度处的土壤月平均温度均为 1 月最低、8 月最高,而土壤月平均体积分含水量的变化趋势则随深度而不同。(2)在气象因子风速风向、空气温湿度、太阳辐射、光合有效辐射、大气压、降雨量、饱和水汽压差中,除土壤温度与降雨量、土壤体积含水量与风向无显著性相关性($P>0.05$)外,三个深度处的土壤温度、体积含水量与其他气象因子均显著相关($P<0.05$)。(3)依据随机森林模型的增长均方误差大小,极显著影响 5、40 cm 深度处土壤温度和三个深度处土壤体积分含水量的前四个气象因子均为空气温度、风速、空气相对湿度、大气压($P<0.01$),而空气温度、空气相对湿度、风速、大气压则排在极显著影响 20 cm 深度处土壤温度的前四位($P<0.01$)。研究结果可为认识亚高山暗针叶林小气候特征及其对未来环境变化的响应提供参考。

关键词: 岷江冷杉;土壤体积含水量;随机森林模型;川西;亚高山

中图分类号: S716.3

文献标志码: A

土壤水分不仅是生态系统中最活跃、最具影响的因素之一,而且是林木生长和发育的必要环境因子^[1]。土壤温度作为森林生态系统研究的重要内容,是影响森林植物地下部分的重要环境要素之一^[2]。森林土壤温度和水分是植被类型、土壤性质、地形条件和气候要素等自然环境因子综合作

的结果。对某一特定地区而言,气象要素对土壤水分的影响起主导作用^[3]。

森林小气候特征研究是揭示森林生态系统服务功能、评估森林对环境的影响的重要基础^[4]。位于青藏高原东南缘的川西亚高山林区是我国西南林区的主体和长江上游重要的水源涵养地与生态屏障。川

收稿日期(Received date):2020-03-18;改回日期(Accepted date):2021-03-18

基金项目(Foundation item):中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2016MA004,CAFZC2017M004)[Fundamental Research Funds for the Central Non-profit Institution of CAF(CAFYBB2016MA004,CAFZC2017M004)]

作者简介(Biography):赵广东(1974-),男,山东泰安人,博士,副研究员,主要研究方向:森林生态学与植物生理生态学。[ZHAO Guangdong (1974-), male, born in Taian, Shandong province, Ph. D., associate professor, research on forest ecology and plant physiological ecology] E-mail: zhaogdc@126.com

* 通讯作者(Corresponding author):史作民(1968-),男,博士,研究员,主要研究方向:全球变化生态学、恢复生态学和森林生物多样性保育。[SHI Zuomin (1968-), male, Ph. D., professor, specialized in global change ecology, restoration ecology and forest biodiversity conservation] E-mail: shizm@caf.ac.cn

西亚高山林区的海拔高差悬殊,地形多变、地貌复杂,土壤在一年中很长一段时间被积雪覆盖^[5],因此亚高山暗针叶林的林内寒冷阴湿^[6],并且是中国的气候敏感区和典型生态环境脆弱地带^[7],直接承载全球变暖的影响^[8]。早在 1960 年,中国学者已经开展了亚高山冷杉林区小气候的初步研究^[9]。2000 年前后,川西亚高山林区森林小气候的相关研究主要关注裸地和次生林地土壤水分动态变化及其对比^[10]、岷江冷杉(*Abies fargesii* var. *faxoniana*)林内外主要气象因子对比分析^[11]、白桦(*Betula platyphylla*)林、岷江冷杉林和紫果云杉(*Picea purpurea*)林在生长季节的小气候特征^[12-14]。在上述研究中,气象数据观测和记录的时间多为每年的生长季节,气象站安装位置的最高海拔为 3400 m^[9],缺少气象因子与土壤温度和水分相关性及其对两者影响程度大小的探讨与分析。

川西米亚罗林区的原生森林以亚高山暗针叶林为主,主要优势树种为岷江冷杉,分布于海拔 2400 ~ 4200 m 之间^[15]。本文选择在川西亚高山林区分布海拔 3600 m 以上的暗针叶林内安装 HOBO U30 自动气象站,进行土壤温度、体积含水量和气象数据的连续观测,目的在于:(1)探讨亚高山暗针叶林土壤温度和体积含水量的动态变化特征;(2)分析气象数据与土壤温度和体积含水量的相关性;(3)比较运用气象数据预测不同深度处土壤温度和体积含水量时,不同气象因子的重要性大小,以期为川西亚高山林区的天然林保育、生物多样性共存机制分析及其对气候变化的响应提供基础数据和科学依据。

1 材料方法

1.1 研究区概况

研究地点位于四川省阿坝藏族羌族自治州理县境内的米亚罗省级自然保护区(31°11' ~ 31°47'N, 102°35' ~ 103°31'E),海拔 2458 ~ 4619 m,属于青藏高原—四川盆地的过渡地带。年平均气温 2.7℃,年均降水量 850 mm,多集中在生长季^[16]。研究区内原有主要森林类型为亚高山暗针叶林^[15]。2016 年 7 月至 2019 年 9 月,在四川米亚罗省级自然保护区的毕棚沟(31°14' ~ 31°19'N, 102°53' ~ 102°57'E)建立了一个 9.6 hm² (400 m × 240 m)的亚高山暗针叶林动态样地,坡向东南,平均坡度 31.07°,林分郁

闭度 0.5 ~ 0.7。基于 2019 年 9 月完成的调查数据,动态样地内的建群种为岷江冷杉,优势乔木有岷江冷杉、糙皮桦(*Betula utilis*)和密枝圆柏(*Juniperus convallium*);灌木主要有紫花茶藨子(*Ribes luridum*)、峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*)、红脉忍冬(*Lonicera nervosa*)、云南樱桃(*Cerasus yunnanensis*)和山光杜鹃(*Rhododendron oreodoxa*)等。主要草本为苔草(*Carex tristachya*)、蟹甲草(*Cacalia auriculata*)和高山冷蕨(*Cystopteris montana*)等^[17]。土壤为山地棕壤,石砾含量较多。

1.2 数据采集

为保证不人为破坏动态样地,2018 年 8 月 17 日在米亚罗亚高山暗针叶林 9.6 hm² 动态样地起始点(31°14'43.44"N, 102°53'2.4"E)西北方向约 20 m 处的林内,安装了一套 HOBO U30 自动气象站(Onset Computer Corporation, USA),林内气象站所处样地的详细信息如表 1 所示。该气象站长期观测与记录风速风向、空气温湿度、太阳辐射、光合有效辐射、降雨量、大气压和 5、20、40 cm 深度处的土壤温度和体积含水量(表 2)。数据采集和记录间隔为 30 min。2018 年 10 月开始,每 6 个月下载一次数据。截至目前,HOBO U30 自动气象站自安装之日起运行正常,并按照初始设置观测和记录数据。

表 1 安装有 HOBO U30 自动气象站的样地信息
Tab. 1 Information of the plot installed HOBO U30 automatic-meteorological station

面 积	海拔/ m	坡 向	坡度/ (°)	土层厚 度/cm	郁闭 度	优势 树种
20 m × 20 m	3612.23	东南	22	50 ~ 90	0.5	岷江冷杉、糙皮桦、 紫花茶藨子、红脉 忍冬、山光杜鹃

表 2 HOBO U30 自动气象站观测和记录指标的传感器型号
Tab. 2 Sensor type of observation indicator in HOBO U30 auto-meteorological station

观测指标	传感器型号
风速风向	S - WCA - M003
空气温湿度	S - THB - M002
太阳辐射	S - LIB - M003
光合有效辐射	S - LIB - M002
降雨量	S - RGB - M002
大气压	S - BPB - CM50
土壤温度	S - TMB - M006
土壤体积含水量	S - SMC - M005

1.3 饱和水汽压差计算

饱和水汽压差^[18]计算公式为:

$$VPD = 0.611 \times e^{\frac{17.27 \times Temp}{273.3 + Temp}} \times (1 - \frac{RH}{100}) \quad (1)$$

式中, VPD 为饱和水汽压差 (kPa); $Temp$ 为空气温度 ($^{\circ}\text{C}$); RH 为空气相对湿度 (%)。

1.4 数据统计分析

采用 Pearson 相关分析检验土壤温度和体积含水量与气象因子的相关性。基于气象数据, 运用线性回归 (Linear Regression, LR)、随机森林 (Random Forest, RF) 和极限梯度提升 (Extreme Gradient Boosting, XGB) 模型预测不同深度土壤温度和体积含水量时, 以决定系数 (Coefficient of Determination, R^2)、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 作为评价每个模型优劣的指标。 R^2 越大且 RMSE 越小则模型预测的精度越高^[19]。随机森林模型以增长均方误差 (Increased in Mean Squared Error, IncMSE) 作为衡量变量重要性的指标, 该值越大则变量的重要性越高^[20]。在 R 语言环境下运行 corrplot、flashlight 和 rfPermute 包进行数据分析, 采用 OriginPro2018 作图。

2 结果与分析

2.1 土壤温度的动态变化

2019 年, 亚高山暗针叶林 5、20 和 40 cm 深度处的土壤平均温度分别为 3.97°C 、 3.82°C 和 3.80°C , 0°C 以上累计积温分别是 1527.58、1477.18 和 1411.82 $\text{d} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。随土壤深度的增加, 土壤平均温度和 0°C 以上累计积温均降低。2019 年 3

月 16 日, 5 cm 深度处的土壤开始解冻, 20、40 cm 深度处的土壤解冻时间则分别推后了 7 和 27 d。5、20 cm 深度处的土壤分别在 2019 年 12 月 16 日、2019 年 12 月 19 日进入冻结阶段。2019 年 12 月 31 日, 40 cm 深度处的土壤则尚未进入冻结阶段 (图 1a)。

5、20 和 40 cm 深度处的土壤月平均温度的动态变化趋势基本一致, 1 月的土壤平均温度最低, 分别为 -2.33°C 、 -2.29°C 、 -1.09°C , 此后土壤平均温度随月份而逐渐升高, 在 8 月达到最高值后开始降低。2019 年 8 月, 5、20 和 40 cm 深度处的土壤平均温度分别为 11.44°C 、 11.31°C 、 10.73°C 。多数研究把日平均温度大于 0°C 的时期记为一年之中的暖期, 小于 0°C 的时期则记为一年之中的冷期。5、40 cm 深度处的土壤暖期均为 8 个月, 土壤冷期均为 4 个月; 而 20 cm 深度处的土壤暖期、冷期则分别为 9 个月、3 个月 (图 1b)。

2.2 土壤体积分含水量的动态变化

2019 年, 5、20 和 40 cm 深度处的土壤平均体积分含水量分别为 18.74%、25.08% 和 12.82% (图 2a)。三个深度处的土壤月平均体积分含水量的动态变化趋势不太相同。5、20 cm 深度处的土壤体积分含水量在 1 月最低, 分别为 4.67%、11.53%; 最高值出现在 10 月, 分别为 28.55%、34.62%。40 cm 深度处的土壤体积分含水量则在 2 月最低, 为 3.89%; 其最高值为 17.11%, 出现在 5 月 (图 2b)。

2.3 土壤温度、体积分含水量与气象因子的相关性

从表 3 可以看出, 不同深度处的土壤温度与降雨量的相关性不显著 ($P > 0.05$), 与风速、大气压和饱和水汽压差有极显著的负相关关系 ($P < 0.001$), 与风向、空气温度、空气相对湿度、太阳辐射和光合

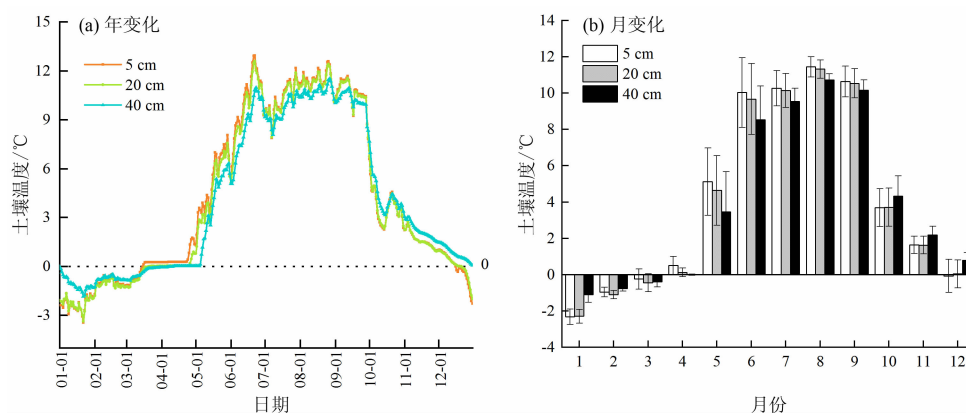


图 1 不同深度处土壤温度的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil temperature in three depths

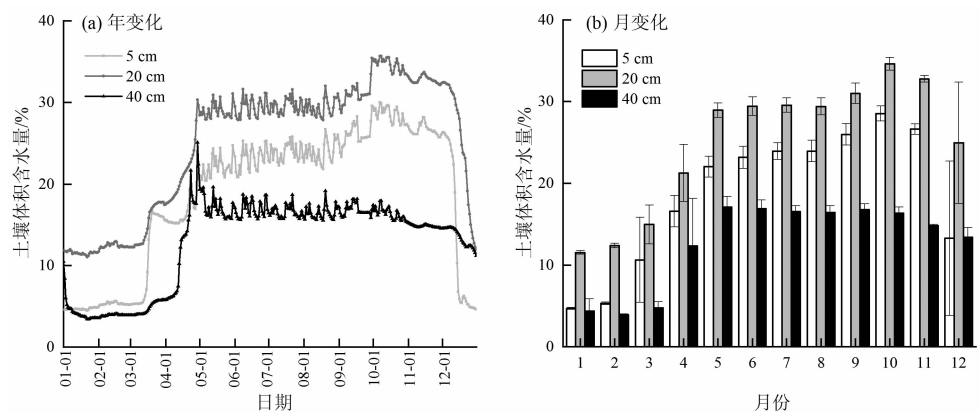


图 2 不同深度处土壤体积含水量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of soil volume water content in three depths

表 3 土壤温度和体积含水量与气象因子的 Pearson 相关系数

Tab. 3 Pearson correlation coefficients between soil temperature, soil moisture and meteorological factors

指标	土壤温度			土壤体积含水量		
	5 cm	20 cm	40 cm	5 cm	20 cm	40 cm
风速	-0.56 ***	-0.56 ***	-0.55 ***	-0.55 ***	-0.53 ***	0.56 ***
风向	0.16 **	0.16 **	0.15 **	0.08ns	0.04ns	0.07ns
空气温度	0.89 ***	0.87 ***	0.83 ***	0.58 ***	0.52 ***	0.63 ***
空气相对湿度	0.58 ***	0.58 ***	0.57 ***	0.57 ***	0.52 ***	0.53 ***
太阳辐射	0.36 ***	0.33 ***	0.26 ***	0.14 *	0.12 *	0.25 ***
光合有效辐射	0.39 ***	0.37 ***	0.29 ***	0.17 **	0.14 **	0.30 ***
降雨量	-0.06ns	-0.07ns	-0.11ns	0.18 ***	0.18 ***	0.22 ***
大气压	-0.55 ***	-0.56 ***	-0.60 ***	-0.44 *	-0.42 *	-0.40 ***
饱和水汽压差	-0.28 ***	-0.29 ***	-0.31 ***	-0.35 ***	-0.34 ***	-0.31 ***

注:***, $P < 0.001$; **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$; ns, $P > 0.05$ 。

有效辐射呈极显著的正相关关系 ($P < 0.001$), 其中不同深度处的土壤温度与空气温度的相关系数均超过了 0.8 ($P < 0.001$)。三个深度处的土壤体积含水量与风向的相关性不显著 ($P > 0.05$), 与空气温度、空气相对湿度、太阳辐射和光合有效辐射呈显著的正相关关系 ($P < 0.05$), 不同深度处的土壤体积含水量与空气温度的相关系数均超过了 0.5 ($P < 0.001$), 大于其与降雨量、太阳辐射、光合有效辐射和降雨量的相关系数, 土壤体积含水量与风速、饱和水汽压差的负相关关系极显著 ($P < 0.001$), 与大气压的负相关关系显著 ($P < 0.01$) (表 3)。

2.4 气象因子对不同深度处土壤温度的重要性和影响程度

基于气象数据, 随机森林模型预测不同深度处

土壤温度时的决定系数最高、均方根误差最小, 因此本文运用随机森林模型比较气象因子对三个深度处土壤温度的重要性和影响程度 (表 4)。

表 4 基于气象数据的土壤温度预测模型的决定系数和均方根误差

Tab. 4 R^2 and RMSE of soil temperature prediction model based on meteorological data

模型	决定系数			均方根误差		
	5 cm	20 cm	40 cm	5 cm	20 cm	40 cm
线性回归	0.92	0.92	0.89	1.39	1.44	1.48
随机森林	0.99	0.99	0.99	0.56	0.56	0.44
极限梯度提升	0.85	0.83	0.92	1.99	2.06	1.25

按照重要性大小,预测 5 cm 深度处土壤温度的气象因子依次为空气温度、风速、空气相对湿度、大气压、光合有效辐射、降雨量、饱和水汽压差、太阳辐射、风向,其中空气温度、风速、空气相对湿度、大气压具有极显著影响($P<0.01$)。预测 20 cm 深度处土壤温度的气象因子依次为空气温度、空气相对湿度、风速、大气压、降雨量、光合有效辐射、饱和水汽压差、太阳辐射、风向,其中空气温度、空气相对湿度、风速、大气压、降雨量具有极显著影响($P<0.01$)。预测 40 cm 深度处土壤温度的气象因子依次为空气温度、风速、空气相对湿度、大气压、降雨量、饱和水汽压差、光合有效辐射、风向、太阳辐射,其中空气温度、风速、空气相对湿度、大气压、降雨量具有极显著影响($P<0.01$)(图 3)。

2.5 气象因子对不同深度处土壤体积含水量的重要性和影响程度

基于气象数据,随机森林模型预测不同深度处土壤体积含水量时的决定系数最高,分别为 0.93、0.92 和 0.94;均方根误差最小,分别为 0.02、0.02

和 0.01(表 5),因此本文运用随机森林模型比较气象因子对三个深度处土壤体积含水量的重要性和影响程度。

表 5 基于气象数据的土壤体积含水量预测模型的决定系数和均方根误差

Tab. 5 R^2 and RMSE of soil volume water content prediction model based on meteorological data

模型	决定系数			均方根误差		
	5 cm	20 cm	40 cm	5 cm	20 cm	40 cm
线性回归	0.47	0.42	0.57	0.06	0.06	0.03
随机森林	0.93	0.92	0.94	0.02	0.02	0.01
极限梯度提升	0.50	0.42	0.52	0.06	0.06	0.04

按照重要性大小,极显著影响三个深度处土壤体积含水量的前四个气象因子为空气温度、空气相对湿度、风速、大气压($P<0.01$),但每个气象因子的重要程度不同。太阳辐射、饱和水汽压差、光合有效辐射排在显著影响5 cm深度处土壤体积含水量

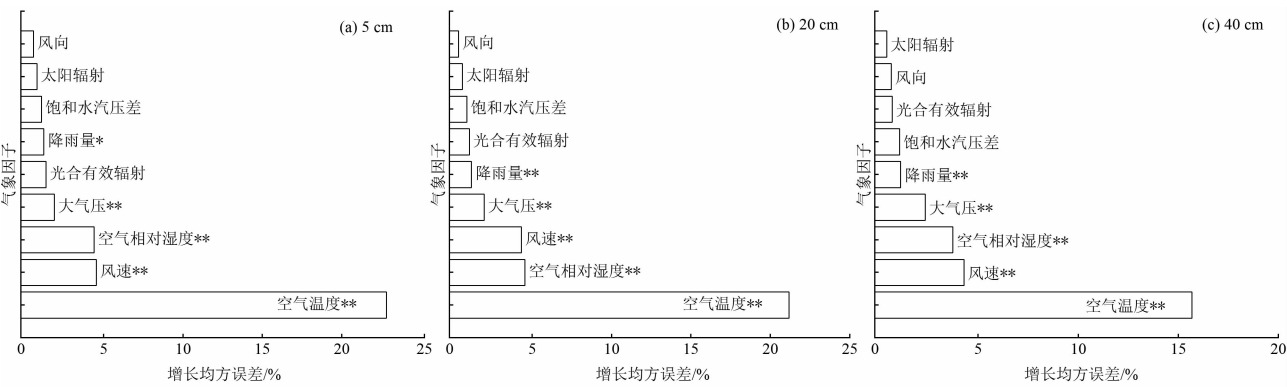


图 3 应用随机森林模型预测土壤温度时气象因子的增长均方误差

Fig. 3 IncMSE of meteorological factors in the prediction of soil temperature with RFM

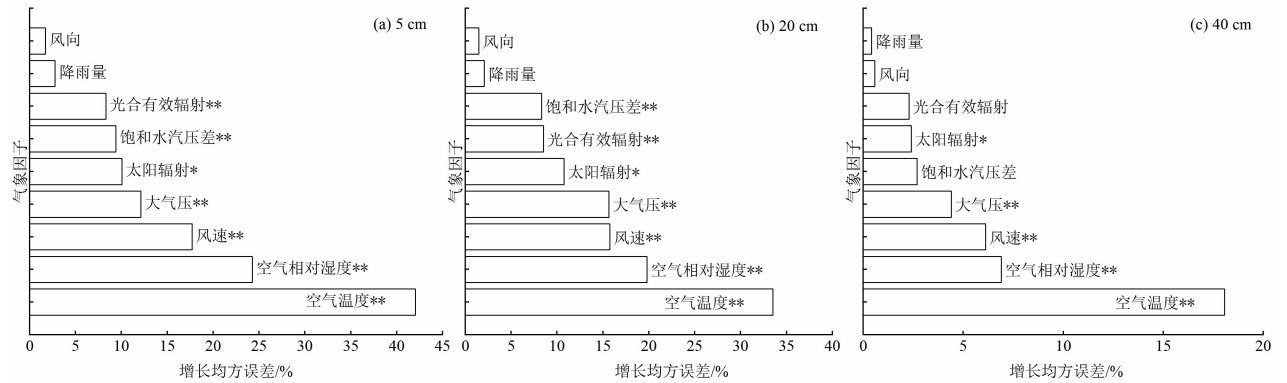


图 4 应用随机森林模型预测土壤体积含水量时气象因子的增长均方误差

Fig. 4 IncMSE of meteorological factors in the prediction of soil volume water content with RFM

的第五位、第六位、第七位;而对 20 cm 深度处的土壤体积含水量而言,三者则分别排在第五位、第七位、第六位。降雨量排在显著影响 40 cm 深度处土壤体积分含水量的第六位($P < 0.05$),但饱和水汽压差和光合有效辐射对 40 cm 深度处的土壤体积分含水量没有显著影响($P > 0.05$)(图 4)。

3 讨论

3.1 土壤温度和体积分含水量的动态变化特征

森林具有与城市^[21]、草地^[22]、湿地^[23]、农田^[24]及其复合生态系统^[25]不同的特点,特别是因其下垫面性质和地被物覆盖^[24]对土壤水热分布及传输的影响强度和范围不同,进而导致了土壤温度和含水量的不同。亚高山暗针叶林不同深度处的土壤温度和体积分含水量具有明显的季节性,而且 2019 年平均土壤温度随深度的增加而降低,这与研究区域范围内微气象环境的季节性变化密不可分^[26],并和马鸿儒^[27]等在天山中部天然林区的研究结果相一致。与藏北高寒草原的研究结果^[28]相比,亚高山暗针叶林的冻结阶段和冷期均较短。三个深度处的土壤月平均温度均在 1 月最低、8 月最高;南亚热带鼎湖山针阔叶混交林^[29]5 cm 深度处的土壤月平均温度在 7 月最高,而 20、40 cm 深度处土壤月平均温度的最高值则出现在 8 月,与本文的研究结果相同。何吉成等^[30]在 2006 年生长季节(5 月 25 日至 10 月 4 日),监测了藏东南色季拉山海拔 4320 m 处急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)林线的气象因子,发现 10 cm 深度处的土壤平均温度为 6.22 °C,而在本研究中的统计结果为 10.27 °C,可能与两个研究地点的海拔高度、植被类型等不同有关。

不同于杨民益^[31]等在宁夏六盘山华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)人工林对土壤水分的研究结论,亚高山暗针叶林的土壤体积分含水量并未随土壤深度的增加而增加,而是呈现为 20 cm 深度 > 5 cm 深度 > 40 cm 深度,表明亚高山暗针叶林 5 cm 深度处的土壤水分极易损失,20 cm 深度处的土壤保水能力较强,而 40 cm 深度处的土壤水分被截留,从而导致其土壤体积分含水量最低,这与杨艳刚^[32]等在山芦芽山林线样带的研究结论类似。人工林与原始林在枯落物层、苔藓层厚度等方面的差异性导致了土壤水分特性^[1]、入渗特征^[33]的

不同,进而改变了土壤水分的动态变化。

3.2 土壤温度和体积分含水量与气象因子的关系

一般来说,森林特别是原始林具有降温、增湿和防风等小气候效应^[29]。亚高山暗针叶林土壤体积分含水量与风向的相关性不显著($P > 0.05$),可能是因为植被冠层和枝干对风的阻挡、摩擦作用^[34]均减缓了风向的作用效果^[35]。16 a 杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林距离地表 5 cm 处的土壤体积分含水量与降雨量之间相关性不显著^[36],而亚高山暗针叶林三个深度处的土壤体积分含水量与降水量均呈现极显著的正相关关系($P < 0.001$)(表 3)。但本研究基于气象数据,应用随机森林模型预测三个深度处土壤体积分含水量时,降水量对亚高山暗针叶林不同深度处土壤体积分含水量的重要性不高且无显著影响($P > 0.05$),可能是由于本研究仅基于亚高山暗针叶林 2019 年的观测数据,同时没有考虑前期降水带来的滞留影响,进而弱化了降水量对土壤水分的影响作用^[37]。亚高山暗针叶林空气温度与土壤温度的相关性随深度的增加而降低,与祁威^[38]等在羌塘高原核心区的研究结论相同。亚高山暗针叶林土壤温度与太阳辐射的相关性随深度的增加而降低,进一步证明了李沙^[39]等在四川梦笔山暗针叶林对两者关系的研究结果。

与大面积的土壤温度和水分长期观测相比,气象因子更容易获取,通过建立气象因子与土壤温度、含水量的关系模型,可以预测森林土壤温度和含水量^[39-40]。本文研究表明,随机森林模型预测亚高山暗针叶林三个深度处土壤温度和含水量时的决定系数最高、均方根误差最小(表 4 和表 5)。土壤温度和含水量的时序比较复杂、非线性程度高^[41]。选择机器学习中相对快捷实用的随机森林模型进行预测,只需简单处理需要的数据,不需要建立极为复杂的方程便可获取预测精度较高的模拟值。

森林小气候指由于森林植被的存在所形成的一种特殊的局部地区的气候^[42]。从 1960 年开始^[9],中国学者在川西亚高山林区开展了不同森林林内、林外的小气候观测和相关研究(表 6)。本文揭示了以岷江冷杉为建群种的亚高山暗针叶林三个深度处土壤温度和体积分含水量的动态变化及其与气象因子风速风向、空气温湿度、太阳辐射、光合有效辐射、大气压、降雨量、饱和水汽压差的相关性,探讨了气象

表 6 川西亚高山林区森林小气候的观测与研究汇总

Tab.6 Summary of observation and research on microclimate of subalpine forest in Western Sichuan

森林类型	海拔/m	观测时间	研究内容	文献来源
冷杉林	3400	1960 年 1—9 月 1961 年 5 月—1963 年 12 月	时间动态、林内外、森林采伐后、不同海拔	[9]
岷江冷杉—大叶杜鹃林	3000	1999—2002 年 5—10 月	土壤水分动态变化	[10]
岷江冷杉林	2730	2001 年 1 月—2002 年 12 月	林内外小气候特征对比	[11]
白桦林	2540	2002 年 5—10 月	生长季节空气和土壤温度动态	[12]
白桦林	2540	2002 年 5 月 12 日—2003 年 5 月 31 日	时空动态特征	[13]
白桦林	2540	2002—2004 年 5—10 月	生长季节小气候特征	[14]
岷江冷杉林	2600		空气温度与土壤温度相关性	
紫果云杉林	2920			

因子对土壤温度和体积含水量的影响程度大小,拓展了川西亚高山林区森林小气候的观测区域,丰富了森林小气候的研究内容。今后应在保证 HOBO U30 自动气象站获取长期观测数据集的基础上,对多年长期观测数据集进行深入分析和充分挖掘,探讨亚高山暗针叶林不同年份小气候特征的差异性^[43]和气象因子对土壤温湿度影响的滞后性效应^[44],并且尽可能在川西亚高山林区典型代表性森林中开展多点联合的长期气象观测,以期更加全面地揭示该林区森林小气候的变化规律及其影响因素。

4 结论

本文基于 2019 年川西亚高山暗针叶林的土壤温度、体积含水量和气象因子数据,运用 Pearson 相关分析和机器学习中的随机森林模型进行了土壤温度和体积含水量的动态变化及其与气象因子的关系研究,探讨了气象因子影响土壤温度和体积含水量的重要性大小,得出以下主要结论:

(1)5、20 和 40 cm 深度处的土壤平均温度分别为 3.97 ℃、3.82 ℃ 和 3.80 ℃,土壤平均体积含水量分别为 18.74%、25.08% 和 12.82%。三个深度处的土壤月平均温度均为 1 月最低、8 月最高,而土壤月平均体积含水量的变化趋势则因深度而不同。

(2)除土壤温度与降雨量、土壤体积含水量与风向的相关性不显著($P>0.05$)外,三个深度处的土壤温度、体积含水量与气象因子风速风向、空气温湿度、太阳辐射、光合有效辐射、大气压、降雨量、饱

和水汽压差均显著相关($P<0.05$)。

(3)空气温度、风速、空气相对湿度、大气压位居极显著影响 5、40 cm 深度处土壤温度和三个深度处土壤体积含水量的气象因子的前四位($P<0.01$);而对 20 cm 处土壤温度而言,前四位则分别为空气温度、空气相对湿度、风速、大气压。

参考文献(References)

[1] 张保华,何毓蓉,周红艺,等. 贡嘎山东坡亚高山不同林地土壤水分特性与生态环境效应[J]. 山地学报, 2004, 22(2):207 - 211. [ZHANG Baohua, HE Yurong, ZHOU Hongyi, et al. Water characteristics and its eco-environmental effects on soils under different subalpine forests on east slope of Gongga Mountain [J]. Mountain Research,2004, 22(2):207 - 211]

[2] 黄承标,韦峰,覃继柔,等. 广西亚热带森林及空旷地土壤温度的比较研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1993, 2(3):117 - 124. [HUANG Chengbiao, WEI Feng, QIN Jirou, et al. Comparative investigation on soil temperature of subtropical forest and glade [J]. Tropical and Subtropical Soil Science, 1993, 2(3):117 - 124]

[3] 王素萍,张存杰,宋连春,等. 多尺度气象干旱与土壤相对湿度的关系研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4):865 - 873. [WANG Suping, ZHANG Cunjie, SONG Lianchun, et al. Relationship between soil relative humidity and the multiscale meteorological drought indexes [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4):865 - 873] DOI: 10.7522/j. issn. 1000 - 0240. 2013. 0098

[4] 孙金伟,吴家兵,关德新,等. 森林与空旷地空气温湿度及土壤温度的长期对比研究[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12):2685 - 2691. [SUN Jinwei, WU Jiabing, GUAN Dexin, et al. A long-term observation on the air temperature, relative humidity, and soil temperature in a mixed forest and its adjacent open site in Changbai Mountains of northeast China [J]. Chinese Journal of Ecology,

- 2011, **30**(12):2685–2691]
- [5] WU Fuzhong, YANG Wanqin, ZHANG Jian, et al. Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season [J]. *Acta Oecologica*, 2010, **36**(1):135–140. DOI: 10.1016/j.actao.2009.11.002
- [6] 李德文, 高跃, 高志勇. 川西亚高山岷江冷杉林小气候特征. 四川林业科技, 2006, **27**(6):30–34. [LI Dewen, GAO Yao, GAO Zhiyong. Characteristics of microclimate in subalpine *Abies faxoniana* forest in western Sichuan Province. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2006, **27**(6):30–34]
- [7] 靳翔, 徐庆, 刘世荣, 等. 川西亚高山岷江冷杉和铁杉年轮对气候因子的响应. 林业科学, 2013, **49**(1):21–26. [JIN Xiang, XU Qing, LIU Shirong, et al. Responses of the tree-ring of *Abies faxoniana* and *Tsuga chinensis* to climate factors in sub-alpine in western Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, **49**(1):21–26] DOI:10.11707/j.1001–7488.20130104
- [8] 汤懋苍, 程国栋, 林振耀. 青藏高原近代气候变化及对环境的影响[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998:147–150. [TANG Maocang, CHENG Guodong, LIN Zhenyao. Climate change and its impact on the environment in the Qinghai-Tibet Plateau in modern times[M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1998:147–150]
- [9] 蒋有绪. 川西米亚罗亚高山冷杉林区小气候的初步研究[J]. 中国农业气象, 1981, **2**(1):71–75 [JIANG Youxu. A preliminary study on microclimate of *Abies faxoniana* forest in western Sichuan [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1981, **2**(1):71–75]
- [10] 张保华, 何毓蓉, 周红艺, 等. 贡嘎山东坡亚高山森林土壤水分动态变化分析[J]. 西南农业学报 2003, **16**(S1):98–100. [ZHANG Baohua, HE Yurong, ZHOU Hongyi, et al. Analysis of water content dynamics of soils under subalpine forest on east slope of Gongga Mountain [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2003, **16**(S1):98–100]
- [11] 郑绍伟, 黎燕琼, 何飞, 等. 卧龙森林生态站林内外主要气象因子对比分析研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2006, **25**(3):210–213. [ZHENG Shaowei, LI Yanqiong, HE Fei, et al. Comparison analysis and research on principal meteorology factors inside & outside Wolong Forest Ecology Station [J]. *Journal of Chengdu University (Natural Science)*, 2006, **25**(3):210–213]
- [12] 李德文, 兰立达. 川西亚高山白桦林内空气和土壤温度动态[J]. 四川林业科技, 2005, **26**(2):27–32. [LI Dewen, LAN Lida. Temperature dynamics of soil and air in subalpine *Betula platyphylla* forest in western Sichuan [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2005, **26**(2):27–32]
- [13] 张远彬, 王开运, 鲜骏仁, 等. 川西亚高山白桦林小气候的时空动态特征[J]. 应用与环境生物学报, 2006, **12**(3):297–303. [ZHANG Yuanbin, WANG Kaiyun, XIAN Junren, et al. Temporal and spatial dynamics characteristics of microclimate in subalpine birch forest in western Sichuan. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2006, **12**(3):297–303]
- [14] 朱育旗, 王德荣, 蒲永波, 等. 西南亚高山 3 种典型森林的小气候特征[J]. 四川林业科技, 2009, **30**(6):12–20. [ZHU Yuqi, WANG Derong, PU Yongbo, et al. Characteristics of microclimate within three typical subalpine forests in southwestern China [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2009, **30**(6):12–20]
- [15] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西米亚罗林区森林恢复的影响因子分析[J]. 林业科学, 2005, **41**(4):189–193. [ZHANG Yuandong, ZHAO Changming, LIU Shirong. The influence factors of sub-alpine forest restoration in Miyaluo, west Sichuan [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, **41**(4):189–193]
- [16] NI Xiangyin, YANG Wanqin, LI Han, et al. The responses of early foliar litter humification to reduced snow cover during winter in an alpine forest [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2014, **94**(4):453–461. DOI: 10.4141/CJSS2013–121
- [17] 刘顺, 杨洪国, 罗达, 等. 川西亚高山不同森林类型土壤呼吸和总硝化速率的季节动态. 生态学报, 2019, **39**(2):550–560. [LIU Shun, YANG Hongguo, LUO Da, et al. Seasonal dynamics of soil respiration and gross nitrification rate of different subalpine forests in western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(2):550–560] DOI:10.5846/stxb201712122237
- [18] XU Junzeng, WEI Qi, PENG Shizhang, et al. Error of saturation vapor pressure calculated by different formulas and its effect on calculation of reference evapotranspiration in high latitude cold region [J]. *Procedia Engineering*. 2012, **28**:43–48. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.680
- [19] WILLMOTT C J. On the validation of models [J]. *Physical Geography*, 1981, **2**(2):184–194. DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213
- [20] BREIMAN L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, **45**(1):5–32.
- [21] 马生丽, 武小钢, 孙凡, 等. 北京城区人工构筑物对比邻绿地土壤温度和含水量的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(2):537–546. [MA Shengli, WU Xiaogang, SUN Fan, et al. Horizontal impacts of urban constructed bodies or patches on the temperature and moisture patterns in the soil of adjacent green space in urban areas of Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(2):537–546] DOI:10.5846/stxb201303290554
- [22] 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[J]. 生态学报, 2018, **38**(1):105–111. [CHE Zongxi, LI Jinjun, WANG Youkui, et al. Characteristics of soil temperature and water content variation in the western Qilian Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(1):105–111] DOI:10.5846/stxb201612292695
- [23] 王世岩, 杨永兴, 杨波. 三江平原典型湿地土壤温度变化及其影响因子分析[J]. 地理研究, 2003, **22**(3):129–136. [WANG Shiyan, YANG Yongxing, YANG Bo. Study on

- temperature of typical types of wetland soils and its influencing factors in the Sanjiang Plain [J]. *Geographical Research*, 2003, **22**(3):129–136]
- [24] 崔爱花, 杜传莉, 黄国勤, 等. 秸秆覆盖量对红壤旱地棉花生长及土壤温度的影响[J]. *生态学报*, 2018, **38**(2):733–740. [CUI Aihua, DU Chuanli, HUANG Guoqin, et al. Effects of straw mulching amount on cotton growth and soil temperature in red soil drylands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(2):733–740] DOI:10.5846/stxb201610272194
- [25] 郝俊, 陈超, 王建立, 等. 贵州喀斯特山区人工草地-农田景观土壤温度界面季节性变化[J]. *生态学报*, 2017, **37**(11):3816–3823. [HAO Jun, CHEN Chao, WANG Jianli, et al. Seasonal variation of the edge influence of soil temperature on cultivated grassland-cropland boundaries in Karst areas of Guizhou Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(11):3816–3823] DOI: 10.5846/stxb201604200744
- [26] RAPPJ M, SILMAN M R. Diurnal, seasonal, and altitudinal trends in microclimate across a tropical montane cloud forest [J]. *Climate Research*, 2012, **55**(1):17–32. DOI:10.3354/er01127
- [27] 马鸿儒, 吉春容, 李新建, 等. 天山中部白杨沟天然林区森林小气候观测与分析[J]. *干旱区研究* 2011, **28**(2):251–254. [MA Hongru, JI Chunrong, LI Xinjian, et al. Observation and analysis on microclimate in the natural forest zone in the central Tianshan Mountains [J]. *Arid Zone Research*, 2011, **28**(2):251–254]
- [28] 李卫朋, 范继辉, 沙玉坤, 等. 藏北高寒草原土壤温度变化与冻融特征[J]. *山地学报*, 2014, **32**(4):407–416. [LI Weipeng, FAN Jihui, SHA Yukun, et al. Soil temperature variation and thaw-freezing cycle in the alpine cold steppe, northern Tibetan Plateau [J]. *Mountain Research*, 2014, **32**(4):407–416]
- [29] 欧阳旭, 李跃林, 张倩媚. 鼎湖山针阔叶混交林小气候调节效应[J]. *生态学杂志*, 2014, **33**(3):575–582. [OUYANG Xu, LI Yuelin, ZHANG Qianmei. Characteristics of microclimate in a mixed coniferous and broadleaf forest in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(3):575–582] DOI:10.13292/j.1000–4890.2014.0044
- [30] 何吉成, 罗天祥, 徐雨晴. 藏东南色季拉山急尖长苞冷杉 (*Abies georgei* var. *smithii*) 林线的生态气候特征[J]. *生态学报*, 2009, **29**(1):41–50. [HE Jicheng, LUO Tianxiang, XU Yuqing. Characteristics of eco-climate at smith fir timberline in the Sergyemla Mountains, southeast Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(1):41–50]
- [31] 杨民益, 杜阿朋, 王彦辉. 六盘山华北落叶松人工林地土壤水分动态研究[J]. *水土保持研究*, 2009, **16**(6):129–134. [YANG Minyi, DU Apeng, WANG Yanhui. Dynamics of soil water under *Larix principis-rupprechtii* plantation in the Liupan Mountains [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, **16**(6):129–134]
- [32] 杨艳刚, 江源, 张文涛, 等. 山西芦芽山林线附近土壤水分空间分布特征及其影响因素[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, **28**(2):120–127. [YANG Yangang, JIANG Yuan, ZHANG Wentao, et al. Spatial distribution of soil water content and its influential factors in transition zone along the treeline of Luya Mountain, Shanxi Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, **28**(2):120–127]
- [33] 余新晓, 赵玉涛, 张志强, 等. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(1):15–19. [YU Xinxiao, ZHAO Yutao, ZHANG Zhiqiang, et al. Characteristics of soil water infiltration in sub-alpine dark coniferous ecosystem of upper reaches of Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(1):15–19]
- [34] 肖金香, 方运霆. 江西资溪县马头山自然保护区森林小气候变化特征研究[J]. *江西农业大学学报*, 2003, **25**(5):20–24. [XIAO Jinxiang, FANG Yunting. Studies on variation characteristics of forest microclimate in Matoushan Nature Reserve in Zixi County [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2003, **25**(5):20–24]
- [35] 王霞, 李永涛, 魏海霞, 等. 黄河三角洲白蜡人工林小气候特征的时空动态变化[J]. *东北林业大学学报*, 2017, **45**(4):60–64+80. [WANG Xia, LI Yongtao, WEI Haixia, et al. Spatial temporal variation process of microclimate characteristics of *Fraxinus chinensis* plantation in the Yellow River Delta [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2017, **45**(4):60–64, 80] DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2017.04.012
- [36] 陈媛媛. 杉木人工林土壤水分与环境因子关系研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2013:30–31. [CHEN Yuanyuan. The relations of Chinese fir plantation soil moisture and environmental factors[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013:30–31]
- [37] 唐振兴, 何志斌, 刘鹤. 祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应[J]. *生态学报*, 2012, **32**(4):1056–1065. [TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hu. Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(4):1056–1065] DOI: 10.5846/stxb201010091418
- [38] 祁威, 张懿铨, 刘林山, 等. 羌塘高原核心区2013–2014年土壤温度变化特征[J]. *地理研究*, 2017, **36**(11):2075–2087. [QI Wei, ZHANG Yili, LIU Linshan, et al. Characteristics of soil temperature variation in core region of northern Tibetan Plateau in China during 2013–2014 [J]. *Geographical Research*, 2017, **36**(11):2075–2087] DOI:10.11821/dlyj201711004
- [39] 李沙, 刘冬梅, 孙辉. 西南亚高山森林土壤表层温度变化特征及拟合模型[J]. *西北林学院学报*, 2013, **28**(3):34–39. [LI Sha, LIU Dongmei, SUN Hui. Annual temperature dynamic characteristics and modeling of subalpine forest topsoil in southwestern China [J]. *Journal of Northwest Forestry University*,

- 2013, **28**(3):34–39] DOI: 10.3969/j.issn.1001–7461.2013.03.06
- [40] 杨绍富, 刘志辉, 闫彦, 等. 融雪期土壤湿度与土壤温度、气温的关系[J]. 干旱区研究, 2008, **25**(5):642–646. [YANG Shaofu, LIU Zhihui, YAN Yan, et al. Preliminary study on soil humidity and its relationships with soil temperature and air temperature in snow melting season [J]. Arid Zone Research, 2008, **25**(5):642–646]
- [41] 邹平, 杨劲松, 姚荣江. 土壤温度时间序列预测的 BP 神经网络模型研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(4):835–838. [ZOU Ping, YANG Jinsong, YAO Rongjiang. Application of BP neural network in forecasting soil temperature time-series [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, **16**(4):835–838] DOI:10.3724/SP.J.1011.2008.00835
- [42] 贺庆棠. 气象学(修订版)[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993: 179–184. [HE Qingtang. Meteorology (revised edition) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993:179–184]
- [43] 徐飞, 贾仰文, 牛存稳, 等. 横断山区气温和降水年季月变化特征[J]. 山地学报, 2018, **36**(2):171–183. [XU Fei, JIA Yangwen, NIU Cunwen, et al. Variation character of annual, seasonal and monthly temperature and precipitation [J]. Mountain Research, 2018, **36**(2):171–783] DOI:10.16089/j.cnki.1008–2786.000313
- [44] 何兴潼, 袁淑杰, 谷晓平, 等. 贵州省喀斯特区域土壤水分持续上升时期气象要素对土壤水分的影响[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(2):87–94. [HE Xingtong, YUAN Shujie, GU Xiaoping, et al. Response of soil moisture in arising term to meteorological factors over karst area of Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(2):87–94] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.015

Soil Temperature and Moisture Dynamics and Their Relationship with Meteorological Factors of Subalpine Dark Coniferous Forest in Western Sichuan, China

ZHAO Guangdong^{1,2}, CHEN Jian^{1,2}, SHI Zuomin^{1,2,3*}, YANG Hongguo⁴, XU Gexi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration,

Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Miyaluo Research Station of Alpine Forest Ecosystem, Lixian County 623100, Sichuan, China;

3. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

4. Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Dark coniferous forest is the main forest type in the subalpine region of Western Sichuan, but the correlation between meteorological factors and soil temperature, soil moisture, their effects on the above two in the subalpine dark coniferous forest are still unclear until now. Soil temperature and volume water content dynamics of dark coniferous forest in western Sichuan in 2019 and their relationship with meteorological factors were studied and the effects of meteorological factors to soil temperature and volume water content was discussed by Random Forest Model. The results showed that: (1) The soil average temperature in the depth of 5 cm, 20 cm and 40 cm was 3.97 °C, 3.82 °C, 3.80 °C, and the soil average volume water content at the same position was 18.74%, 25.08%, 12.82%, respectively. The soil monthly average temperature in three different depths was the lowest in January and the highest in August, while the change of the monthly average volume water content varied with the soil depths. (2) Among wind speed and direction, air temperature and humidity, solar radiation, photosynthetic active radiation, atmospheric pressure, precipitation and saturated water vapor pressure deficit, except for the correlation between soil temperature and rainfall, soil volume water content and wind direction, the soil temperature and volume water content in the three depths were significantly correlated with other meteorological factors ($P < 0.05$). (3) According to the Increased in Mean Squared Error of Random Forest Model, the first four

meteorological factors that significantly affected the soil temperature in the depths of 5 cm and 40 cm and the soil volume water content were air temperature, wind speed, air relative humidity and atmospheric pressure ($P < 0.01$). For the soil temperature in the depths of 20 cm, those were air temperature, air relative humidity, wind speed and atmospheric pressure ($P < 0.01$). The research provides a reference for the microclimatic characteristics of subalpine dark coniferous forest and its response to environmental change in the future.

Key words: *Abies fargesii* var. *faxoniana*; soil volume water content; random forest model; Western Sichuan; subalpine region

大型滑坡坝溃决对下游河谷坡岸的影响分析 ——以白格滑坡下游 50 km 内的河谷边坡为例

刘 青, 王 伟*, 高 星, 兰恒星

(中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室)

滑坡作为地质灾害的主要类型之一,常造成惨重的人员伤亡和巨大的经济损失。堰塞湖灾害是滑坡灾害最严重的次生灾害之一,短时间内积聚造成的蓄水,一旦溃决泛滥,给下游造成巨大损失。

中国西南山区地形高差悬殊、构造活动强烈、气候分异明显,位于长江上游以及澜沧江、雅鲁藏布江等西南诸河,是堰塞湖灾害的高发区,历史上发生过多起大型堰塞湖溃决灾害事件。目前在堰塞湖形成过程监测、溃决洪水过程模拟等方面有相当的理论和技术研究,但是关于堰塞湖溃决之后泄流水体对下游河段造成的影响程度和范围等方面仍存在较大的理论技术挑战。

以金沙江白格滑坡下游一定范围内的河谷边坡为代表区域,将遥感信息提取技术、GIS 技术与空间分析等方法相结合,定量地研究了堰塞湖泄流对河谷边坡的影响;并综合考虑了河流形态发育中的重要影响因素,从地形、地貌和地质三个方面分析了不同影响因素对冲刷效果的影响,对该区域滑坡灾害的预防以及大型工程选址建设具有参考价值。

详见本期《大型滑坡坝溃决对下游河谷坡岸的影响分析——以白格滑坡下游 50 km 内的河谷边坡为例》一文。