

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0102

周炜, 翁白莎, 严登华, 等. 怒江源区季节冻土短历时冻融事件评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 1027-1040. ZHOU W, WENG B S, YAN D H, et al. Evaluation for short-duration freeze-thaw events of seasonally frozen soil in the headstreams of Nujiang River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 1027-1040. (in Chinese)

怒江源区季节冻土短历时冻融事件评价

周炜^{1,2}, 翁白莎^{2,3}, 严登华^{2,3}, 栾清华⁴

(1. 河北工程大学河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 呼和浩特 010020; 4. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098)

摘要:为探究怒江源区季节冻土的冻融特性,选取源区 4 个典型试验场 5 cm 表层土壤中发生的短历时冻融事件作为研究对象,明确事件内涵、提出事件具体判别方法并对事件发生的特性进行评价。评价内容由起止时间、总历时、总次数、循环频率、强度共 5 项组成。其中在强度评价,采用 Copula 函数法联合温差、湿差、历时 3 个单一指数构建更全面高效的综合指数,并针对冻结和冻融两个不同的过程分别进行评价。研究表明:怒江源区不同地理位置的短历时冻融事件特性具有差异,中海拔区(4 500 ~ 5 000 m.a.s.l.)的事件比低海拔区(<4 500 m.a.s.l.)和高海拔区(>5 000 m.a.s.l.)的事件呈现出总历时更长、总次数更多、循环频率更高、累加强度更大的特征规律;高频或高强度的事件能够极大影响甚至破坏土壤环境,对此更应注重怒江源区北部区域的冻融监测和防护;冻结和冻融是两个强度效应不同的过程,分别评价可避免强度被削弱的问题。研究成果有利于明晰高原寒区季节冻土冻结及融化的特性,进而体现短历时冻融事件的影响,为源区水土保持、冻胀与融塌危害防控提供支撑。

关键词:季节冻土;冻融事件;Copula 函数;怒江源区

中图分类号:TV213;S152 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



土壤冻融事件是一次土壤中的水分发生冻结和融化的过程^[1-2],多次连续发生的冻融事件形成冻融循环现象,并且能在广袤地域的不同地区间演变成不同特性的冻融格局。冻融事件频发能够极大地改变土壤理化性质,影响地表-大气之间物质与能量的交换和平衡,甚至形成冻融侵蚀和泥石流灾害、造成冻融土地干旱和荒漠化等问题^[3]。青藏高原是地势地貌和水文气象都极特殊和复杂的地域,具有海拔高、地势起伏大、气象骤变等特点^[4]。除冰川和湖泊外,高原季节冻土覆盖面积占 56%^[5],分布广泛,为冻融事件发生提供了重要场所。在气候变暖影响下,高原土壤冻融事件在起止时间、历时、发生频次等特性上均发生了变化且空间差异大。因此,研

究高原高寒区冻融事件特性、演变规律及其影响具有重要的科学意义和应用价值。

冻融事件因形成的驱动条件不同,类型也不同,包括:①由季节转换驱动的事件,完成一次需历时一年,在年内历经冻结过程期(秋入冬)、完全冻结期(冬季)、融化过程期(冬入春)、完全融化期(夏季)4 个时期^[6],在多年间连续形成年冻融循环;②由昼夜变换驱动的事件,完成一次需历时一日或数日(因次日白天气温仍较低而未融),集中发生在冻结过程期和融化过程期^[7],连续形成日冻融循环;③由高原随机天气(气温骤降转阴、降雪降雹)驱动的事件,完成一次只需数小时,在土壤表层更易发生和常见。过往研究中,对①的特性及影响关注较多^[8-10],对②

收稿日期:2022-02-26 修回日期:2022-06-02 网络出版时间:2022-06-07

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220607.1424.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(52022110;51879276);第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0207);中国水科院基本科研业务费项目(MK0145B022021)

作者简介:周炜(1995—),男,浙江绍兴人,主要从事水文水资源研究。E-mail:zw13007615818@163.com

通信作者:翁白莎(1986—),女,福建泉州人,正高级工程师,主要从事极端水文及生态环境效应研究。E-mail:wengbs@iwahr.com

的研究^[11] 缺乏, 陈瑞等^[12] 研究论述中也指明该研究现状, 对③的研究同样缺乏。气候气象变化对②、③的影响显著, 其响应也更加敏感^[7], 因而将②、③合称之为短历时冻融事件, 区别①为长历时冻融事件, 并以短历时冻融事件为研究对象, 通过评价的视角和手段解析其特性。其中特性研究包括两方面: 研究冻融特性在时空分布中呈现的不同特征规律; 研究冻融特性在自身过程阶段(冻结和融化)中呈现的不同特征规律。两方面在①的研究中较为常见^[13-14], 对短历时冻融事件研究存在借鉴意义。

冻融事件可从发生的次数、时间、深度、广度、温度和湿度等特性进行刻画。以往研究者们针对当时的条件和不同的需求, 采用了不同特性的指数进行冻融事件评价, 其中有: 仅用历时(冻结持续天数)^[13-14] 进行评价; 仅用次数(冻融周期)^[15-16] 进行评价; 分别用次数与温度(冻结温度)^[17-18] 同时进行评价; 等等。然而以上指数多是反映单一的指数, 温度只反映冻融的热量变化情况, 湿度只反映水分变化情况, 历时只体现推进顺畅程度, 次数则忽略了冻融本身是种变化过程的性质。仅使用单一指数不能够全面衡量冻融, 而分开逐一阐述又过于低效, 因此根据不同反映层面应采用不同指数进行评价, 而对同一反映层面(例如后文冻融强度层面)则可结合多个单一指数探索构建出更全面高效的综合指数进行评价。

构建综合指数的方法总体有 3 类: 指标权重法、多变量联合法、机器学习法。多变量联合法中的 Copula 函数在水文领域应用广泛, 如: 张迎等^[19]、李军等^[20] 应用 Copula 函数构建新型综合干旱指数对干旱评估; 陈子燊等^[21] 应用 Copula 函数构建三变量联合分布模型对洪水评估; 等等。Copula 函数在处理内部属性存在物理相关性的水文事件中显出良好的适用性和不可替代的优越性^[22]。冻融事件类似于干旱、暴雨洪水事件, 具有特性要素变量和分布规律特征, 同时冻融过程中的温度、湿度、历时之间也存在物理联系, 故采用 Copula 函数构造多维联合

分布产生综合指数评价冻融存在合理性和借鉴经验。

选取怒江源区中的季节冻土地区, 依据野外原型试验和实地考察事实, 主要开展 3 方面的研究: (1) 提出短历时冻融事件的判别方法; (2) 从短历时冻融事件的 5 个特性层面形成评价内容, 并分析其特征规律; (3) 针对强度层面, 考虑冻结和冻融两个过程, 基于历时、温差、湿差 3 个单一指数分别构建综合指数进行评价。

1 研究区概况

怒江源区那曲流域位于西藏北部那曲地区, 地理坐标为 30°54' ~ 32°43'N, 91°12' ~ 92°54'E, 流域控制面积 16 967 km², 平均海拔在 4 500 m 以上。怒江源区主要地貌类型包括高原丘陵、高原平原、高原低山 3 种; 主要土壤类型包括草毡土、草甸土、沼泽土 3 种, 其中草毡土分布最广, 占总面积的 75.29%; 主要冻土类型为多年冻土和季节冻土, 面积分别约 0.16 万 km² 和 1.52 万 km²。怒江源区属于高原亚寒带季风半湿润气候区, 多年平均气温 -0.6 °C, 极端低温为 -41.2 °C, 具有昼夜温差大、极端天气频发的特点, 源区多年平均降水量为 477.8 mm, 多年平均日照时数基本维持在 2 723 h, 多年平均风速为 2.5 m/s^[23]。

2 材料与方法

2.1 定位监测与数据采集

海拔和植被是影响冻融事件的两个大尺度环境因素^[7], 依据两个影响因素的典型性, 遴选怒江源区香茂乡(91°40'54"E, 31°1'41"N)、那曲大桥(91°58'51"E, 31°25'13"N)、措玛乡(91°35'9"E, 32°16'48"N)、小唐古拉(91°49'26"E, 32°33'16"N) 4 个区域布设监测试验场。试验场均位于季节冻土区(试验场的位置分布可见图 6; 气候变暖下, 小唐古拉地区多年冻土与季节冻土并存^[23], 本只针对其季节冻土)。试验场的基本信息见表 1, 其中经纬度、海拔、坡度坡向通过 RTK 系统测量, 坡度以 10 m 水平距离间的海拔落差计算。

表 1 实验场基本信息

Tab. 1 Basic information of the experimental field

试验场	海拔/m	坡度	坡向	孔隙率/%	砂粒含量/%	总有机质含量/(g·kg ⁻¹)
香茂乡	(4 693.4, 4 691.6)	10.20	朝西	40.34	58.77	64.18
那曲大桥	(4 442.0, 4 442.2)	1.15	朝南	55.93	54.77	115.89
措玛乡	(4 730.1, 4 732.0)	10.76	朝西	59.06	38.69	110.23
小唐古拉	(5 013.7, 5 014.8)	6.28	朝南	42.86	72.26	35.05

数据采集通过两种方式获取:一是以连续监测的方式获取土壤温度和湿度数据。采用 EM50 的 5 个型号为 5TM 的传感器测量 5 cm 表层土壤的温度、湿度(液态体积含水率)。传感器连续监测时间为 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日,采集步长为 1 h,温度和湿度的分辨率在 0.1 °C 和 0.1%。传感器在香茂乡、措玛乡、小唐古拉试验场埋设于山坡坡中位置,在那曲大桥试验场埋设于坡底接近平地的位置。二是以土样采集并检测的方式获取土壤理化性质数据。在埋设传感器位置附近以环刀三点法取样的方式采集 5 cm 表层土样,取样时间为 2021 年 6 月 3 日至 8 日。土样检测包含孔隙率、机械组成、有机质含量 3 个指标。孔隙率依据土壤密度-容重比值法测定执行,机械组成依据筛分法测定执行,土壤有机质由 Vario TOC 分析仪测定执行。在检测数据结果中取 3 个土壤样品检测结果的均值,见表 1。

2.2 短历时冻融事件判别及遴选

表层土壤具有孕育短历时冻融事件频发的优良环境,对气候气象变化的响应更为灵敏^[7],故仅判别并遴选出 5 cm 表层土壤中发生的短历时冻融事件作为研究对象。

根据土壤温、湿度曲线变化特征判别短历时冻融事件。当一段温湿度曲线特征满足以下两点设定时视为一次短历时冻融事件并遴选出,见图 1。规定发生一次短历时冻融事件必须包含冻结和融化两个过程且顺序为先冻后融。冻结过程设定在土壤温度降至 0 °C 的时刻起始^[6],在温、湿度达到最低的时刻结束(若温、湿度的最低值不在同一时刻出现,存在一定时间滞后,为全面考虑水热两方面的最低值影响,则设定结束时间为后出现的最低值,见图 1 中 A、B 段),并且冻结过程中必须同时存在 0 °C 到负温、高湿到低湿的转变;融化过程在冻结过程的结束时刻开始,在土壤温湿度达到最高的时刻结束(同理,存在滞后则结束在后出现的最高值,见图 1 中 A、C 段),并且融化过程中必须同时存在负温返回到正温、低湿返回到高湿的转变。若只有温度转变但湿度维持不变时(见图 1 中 E 段),或只有湿度转变但温度维持不变时(见图 1 中 F 段)均不判定为短历时冻融事件。设定一次短历时冻融事件的自身历时不超过 120 h(即 5 d)^[24]。当冻结或融化过程耗时漫长造成整个过程历时大于 120 h 时(见图 1 中 D 段)不判定为短历时冻融事件。

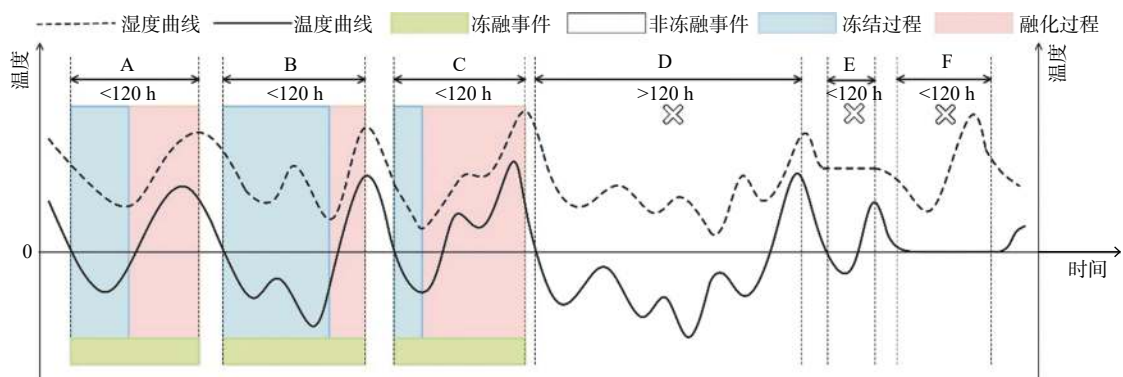


图 1 短历时冻融事件判别及遴选

Fig. 1 Discrimination and selection of short-duration freeze-thaw events

2.3 短历时冻融事件评价内容

短历时冻融事件的评价内容包括事件发生的起止时间、总历时、总次数、循环频率^[7]、强度,其内涵解释如下:

起止时间:指首场事件的开始日期和末场事件的结束日期。

总历时 D :指所有事件发生后经历过的天数。

总次数 N :指所有发生过的事件数量。

循环频率 f :冻融循环是一段时间内连续不断发

生短历时冻融事件后形成的现象。循环频率是构成循环的事件次数(n_c)与循环自身历时(t_c)的比值,计算公式即 $f=n_c/t_c$,反映短历时冻融事件在时间上发生的密集程度。如对冻融循环现象的判别、 n_c 和 t_c 作进一步解析,冻融循环须由 2 次及以上的短历时冻融事件发生构成,当一次事件结束后 120 h(即 5 d)^[24]内无下一次事件的发生,则循环在该次事件结束后中断结束,见图 2(a)。当选取研究的时间段内存在多场循环时,该时间段的 f 计算中, n_c 为每场循环的事件次数总和, t_c 为每场循环的历时总和,

$f=n/t_c=8/(t_1+t_3+t_5)$, 见图 2(a)。

强度 I : 强度反映短历时冻融事件自身发生时的剧烈程度, 衡量事件发生带来的水、热、时变化。过往强度评价基于两种形式: 单一指数法, 即仅在一定时间 t 或温度 T 或湿度 θ 这 3 个层面中选取了其中一种指数进行评价(如只采用温差)^[17-18], 缺乏 3 个层面综合性的评价; 单一过程法, 即仅对冻融整个过程^[3] 或中间过程^[6](冻结或融化)有单独的评价, 缺乏同时评价并对比。为更全面高效评价事件强度, 分别选取以上 3 个层面的单一指数进行综合指数的构建, 且构建考虑到两种过程并对比。一是仅以冻结单向过程 F 构建综合指数, 用于构建的单

一指数选取为冻结过程的历时 t_F 、温差即土壤温度的变化量 T_F 、湿差即土壤液态含水量的变化量 θ_F 。计算公式分别为 $t_F=t_{MIN}-t_0$ 、 $T_F=0-T_{MIN}$ 、 $\theta_F=\theta_0-\theta_{MIN}$; 二是以冻融双向过程 FT 构建综合指数, 用于构建的单一指数选取为冻融过程的历时 t_{FT} 、温差 T_{FT} 以及湿差 θ_{FT} , 计算公式分别为 $t_{FT}=t_{MAX}-t_0$ 、 $T_{FT}=T_{MAX}-T_{MIN}$ 、 $\theta_{FT}=\theta_{MAX}-\theta_{MIN}$, 各单一指数值越大表示强度越大, 见图 2(b)。图 2 中, T_{MIN} 、 θ_{MIN} 分别为冻结过程中最低的土壤温度、湿度; T_{MAX} 、 θ_{MAX} 分别为融化过程中最高的土壤温度、湿度; t_{MIN} 、 t_{MAX} 分别为冻结、融化过程结束的时刻; t_0 为冻结过程开始的时刻; θ_0 为土壤温度在 0 °C 时刻时的土壤湿度。

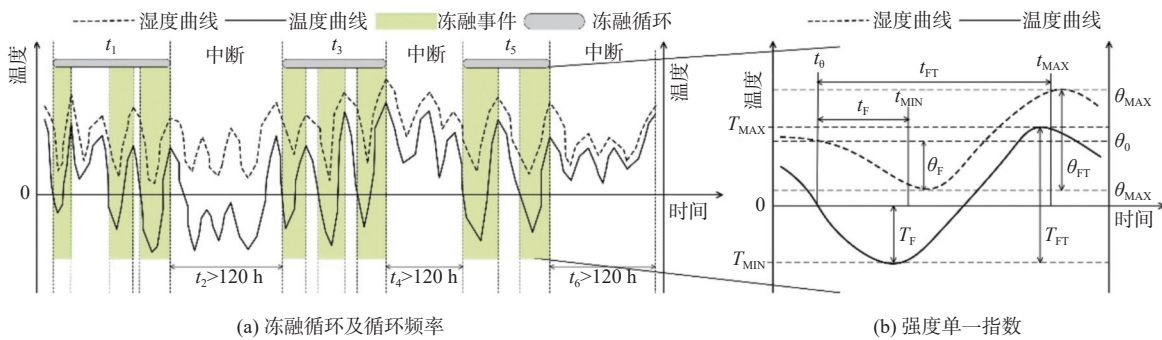


图 2 短历时冻融事件评价内容

Fig. 2 Evaluation content of short-duration freeze-thaw events

评价选取 2019 年 9 月 1 日至 2020 年 8 月 31 日一年内, 上述 4 个实验场中发生的所有短历时冻融事件作为评价对象, 并以上述评价内容进行评价。

2.4 强度综合指数构建方法与步骤

Copula 函数构造多变量联合分布时不需单变量服从同一分布, 不受单变量服从何种分布限制^[22], 故本文采用 Copula 函数法构建强度综合指数, 基本步骤如下:

边缘分布拟合: 选取水文中常见的 5 种分布对强度单一指数进行拟合, 分别为 Gamma(GAM) 分布、Gen. Extreme Value(GEV)分布、Lognormal(LOG) 分布、Log-Logistic(LOL)分布、Weibull(WBL)分布, 采用 Kolmogorov-Smirnov 检验法进行分布的拟合优度检验, 选取拟合最优的分布作为各单一指数的边缘分布。

Copula 函数选择: 选取 Archimedean Copula 函数族中常用的 3 种 Copula 函数进行联合分布的构建, 分别为 Clayton、Frank 和 Gumbel Copula 函数, 该函数族参数结构简单, 可以构造多种形式、适应性强的多变量联合分布函数。采用极大似然法估

计 Copula 函数参数, 适应于二维及以上维度的估计; 采用 AIC 信息准则、RMSE 对经验分布和理论分布进行拟合优度评价, 选取拟合最优的 Copula 函数用于强度综合指数构建。

强度综合指数构建: 把 t 、 T 、 θ 视为随机变量 X_1 、 X_2 、 X_3 , 边缘分布为 $F(x_1)$ 、 $F(x_2)$ 、 $F(x_3)$, 联合分布 P 用拟合最优的 Copula 函数进行连接后获得累积联合概率 q , 公式为

$$P(x_1 < X_1, x_2 < X_2, x_3 < X_3) = C[F(x_1), F(x_2), F(x_3)] = q \tag{1}$$

利用累积联合概率 q 获得 F 和 FT 两种构建过程下的强度综合指数, 公式为

$$R_F = \varphi^{-1}(q_F) \tag{2}$$

$$R_{FT} = \varphi^{-1}(q_{FT}) \tag{3}$$

式中: φ 为标准正态分布; R_F 、 R_{FT} 分别为 F、FT 构建下的强度综合指数, 指数值越大表示强度越大; q_F 和 q_{FT} 分别对应其累积联合概率。

强度综合指数归一化处理: 对构建的强度综合指数进行正向指标的归一化处理, 公式为

$$I_{RF} = \frac{R_F - R_{F,MIN}}{R_{F,MAX} - R_{F,MIN}} \quad (4)$$

$$I_{RFT} = \frac{R_{FT} - R_{FT,MIN}}{R_{FT,MAX} - R_{FT,MIN}} \quad (5)$$

式中: $I_{F,MIN}$ 、 $I_{FT,MIN}$ 分别为 F、FT 构建下所有事件中强度综合指数的最小值; $I_{F,MAX}$ 、 $I_{FT,MAX}$ 为 F、FT 构建 F 所有事件中强度结合指数的大值。最终将归一化后的指数作为强度评价的指标。

3 结果与分析

3.1 时间、次数、频率评价结果

怒江源区表土短历时冻融事件主要集中在 10—12 月和 3—5 月发生,总体从秋季气候变冷开始逐渐频繁发生,深冬来临前又逐渐停止,来年春季气候变暖继续逐渐频繁发生,进入初夏之前完全结束。各实验场中事件发生的起止日期、总历时、总次数及循环频率见表 2。

表 2 各试验场内事件时间、次数和循环频率

Tab. 2 Time, number and cycle frequency of events in each experimental field

试验场	首场事件发生时间	末场事件发生时间	总历时/d	总次数	循环历时	循环频率/(次·d ⁻¹)
香茂乡	2019-11-02	2020-04-20	98	64	2019-11-10—2019-12-02	0.865
					2020-02-12—2020-02-21	
					2020-03-01—2020-04-13	
那曲大桥	2019-11-30	2020-03-25	28	24	2019-11-30—2019-12-02	0.857
					2020.02.28—2020.03.25	
措玛乡	2019-10-17	2020-04-27	140	103	2019-10-22—2019-12-10	0.904
					2020-02-01—2020-02-26	
					2020-03-12—2020-04-18	
小唐古拉	2019-10-15	2020-05-28	61	33	2019-10-15—2019-11-03	0.846
					2020-04-16—2020-04-21	
					2020-04-28—2020-05-13	

短历时冻融事件在各试验场中以小唐古拉、措玛乡、香茂乡、那曲大桥的顺序依次开始发生,来年以完全相反的顺序依次结束,总体源区北部比南部出现的早,结束的晚。2019—2020 年,最高海拔位置的小唐古拉比最低海拔位置的那曲大桥出现首场事件早 45 d 左右,结束末场事件晚 64 d 左右,两地在起止时间上差距最大。同时,小唐古拉比香茂乡早 18 d、晚 37 d 左右,比措玛乡早 2 d、晚 31 d 左右。各地之间结束末场事件的时间差距比开始首场事件的时间差距更大一些。所有事件在总时间跨度上,措玛乡历经时间最长为 140 d,其次为香茂乡 98 d、小唐古拉 61 d,那曲大桥最短仅历经 28 d。处于中海拔位置区的措玛乡和香茂乡总历时明显更长。综上,源区内的短历时冻融事件在起止时间、总历时上空间差异明显。

短历时冻融事件在 4 个试验场中共发生 224 次,各地总次数由多到少依次为措玛乡(103 次)、香茂乡(64 次)、小唐古拉山(33 次)、那曲大桥(24 次)。与总历时规律相同,中海拔位置区域的两试验场总

次数较多。其中次数最多的措玛乡大约是香茂乡、小唐古拉、那曲大桥的 1.5 倍、3 倍、4 倍。综上,总次数的空间差异同样明显。

首场事件发生后不一定随即产生冻融循环现象,如中海拔位置的香茂乡、措玛乡大约在首场事件 7~10 d 后才能形成稳定且循环往复的冻融。各地从入秋至 12 月中旬前循环都将陆续中断,历经冬季在 2 月初以后循环又陆续开始;其间由于环境气温会存在阶段性偏高或偏低的波动,循环也会在该阶段被短暂中段后又继续开始,如香茂乡、措玛乡和小唐古拉。在循环频率上,措玛乡最高(0.904 次/d),反映出该地短历时冻融在时间上更密集频繁,表土响应气温变化也更灵敏,易受冻融影响;香茂乡(0.865 次/d)、那曲大桥(0.857 次/d)、小唐古拉(0.846 次/d)依次降低。循环频率与总次数顺序规律稍有不同,区域发生事件次数多不一定能更紧密接连地发生,如那曲大桥与小唐古拉。但总体上,中海拔位置区域的两试验场循环频率更大。综上,循环频率的空间差异同样明显。

3.2 强度综合指数构建

强度单一指数边缘分布:各强度单一指数最优边缘分布的选择见表 3,冻结温差为 LOG、冻结湿差为 LOG、冻结历时为 GEV、冻融温差为 GEV、冻融湿差为 GEV、冻融历时为 WBL

融湿差为 GEV、冻融历时为 GAM,最优拟合的边缘分布均能通过 95% 显著性检验。将强度单一指数的最优边缘分布函数作为理论分布函数,其与经验分布函数的展示见图 3,两者的拟合程度是优良的。

表 3 边缘分布函数参数估计及拟合优度检验

Tab. 3 Marginal distribution function parameters estimation and goodness of fit test

特征变量	边缘分布	参数	K-S检验结果	
			D_n	P值
冻结温差	GEV	$k=0.299\ 71\ \sigma=1.692\ 5\ \mu=1.693\ 5$	0.071 8	0.189 5
	LOG	$\sigma=1.014\ 5\ \mu=0.741\ 9$	0.043 6	0.770 9
	LOL	$\alpha=1.707\ 7\ \beta=2.082$	0.051 9	0.564 8
冻结湿差	GEV	$k=0.266\ 16\ \sigma=1.291\ 1\ \mu=1.831\ 4$	0.046 7	0.694 3
	LOG	$\sigma=0.753\ 11\ \mu=0.831\ 46$	0.044 9	0.739 3
	LOL	$\alpha=2.329\ 7\ \beta=2.279\ 7$	0.045 2	0.733 0
冻结历时	GAM	$\alpha=3.772\ 7\ \beta=2.232\ 6$	0.044 4	0.753 1
	GEV	$k=-0.045\ 88\ \sigma=3.566\ 1\ \mu=6.519\ 7$	0.042 5	0.796 9
	WBL	$\alpha=2.228\ 9\ \beta=9.386\ 6$	0.052 5	0.550 9
冻融温差	GAM	$\alpha=3.463\ 4\ \beta=2.116\ 1$	0.043 7	0.769 0
	GEV	$k=0.004\ 64\ \sigma=3.134\ \mu=5.505\ 6$	0.043 5	0.772 5
	WBL	$\alpha=2.059\ 3\ \beta=8.193\ 6$	0.057 7	0.429 3
冻融湿差	GAM	$\alpha=7.973\ 2\ \beta=0.834\ 99$	0.045 2	0.732 6
	GEV	$k=-0.122\ 93\ \sigma=2.108\ \mu=5.671\ 6$	0.043 5	0.773 0
	LOL	$\alpha=4.572\ 9\ \beta=6.200\ 5$	0.064 5	0.295 7
冻融历时	GAM	$\alpha=3.713\ 2\ \beta=3.149\ 7$	0.052 1	0.558 3
	GEV	$k=-0.007\ 95\ \sigma=4.768\ 0\ \mu=8.961\ 6$	0.057 7	0.429 0
	WBL	$\alpha=2.079\ 4\ \beta=13.241\ 2$	0.057 8	0.427 5

注:仅展示检验结果前3优的分布。

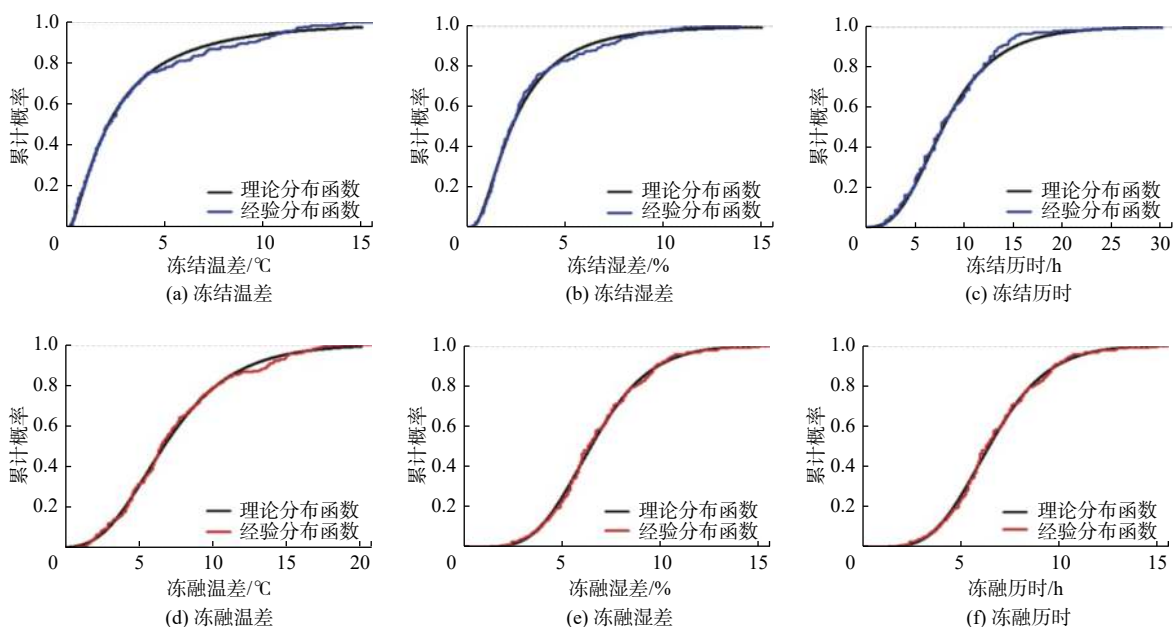


图 3 单一指数经验与理论分布函数

Fig. 3 Empirical and theoretical distribution functions of single index

Copula 函数及联合分布: 基于最优边缘分布, 引入 Copula 函数分别建立 F 和 FT 两种过程下的二维和三维联合分布。构建前对强度单一指数之间进行相关性分析, 其中温差-历时的相关性较强, Spearman 相关系数达 0.8 以上, 湿差-历时、温差-湿差的相关性较弱, Spearman 相关系数在 0.5、0.3 以上。Copula 函数的参数估计及拟合优度评价结果见表 4。根据均方根误差 (RMSE) 和赤池信息量 (AIC) 评判准则, Clayton Copula 函数对冻结温差-湿差、冻结湿差-历时、冻融温差-湿差、冻融湿差-历

时、冻结温差-湿差-历时的拟合效果最优, Frank Copula 函数对冻结温差-历时、冻融温差-湿差-历时的拟合效果最优, Gumbel Copula 函数对冻融温差-历时的拟合效果最优。选择对应最优 Copula 函数构建联合分布和强度综合指数。图 4 为最优 Copula 函数下的理论与经验频率值拟合效果图, 散点值均匀分布在 45° 对角线附近, 且经验与理论频率两者 R^2 均在 0.95 以上, 更直观反映所选最优 Copula 函数对联合分布的拟合效果是优良的。

表 4 Copula 函数参数估计及拟合优度评价

Tab. 4 Copula function parameters estimation and goodness of fit test

表征指数	Copula函数	函数参数	AIC	RMSE	表征指数	Copula函数	函数参数	AIC	RMSE
冻结温差-湿差	Frank	1.797	-766.837	0.032	冻融温差-历时	Frank	3.570	-925.718	0.016
	Clayton	0.697 5	-832.976	0.024		Clayton	0.552 3	-772.043	0.032
	Gumbel	1.102	-720.288	0.040		Gumbel	1.531	-939.043	0.015
冻结温差-历时	Frank	10.660	-846.898	0.023	冻融湿差-历时	Frank	0.715 9	-850.787	0.022
	Clayton	2.589	-777.683	0.031		Clayton	0.186 4	-861.955	0.021
	Gumbel	2.717	-768.085	0.032		Gumbel	1.042	-824.337	0.025
冻结湿差-历时	Frank	3.411	-799.969	0.028	冻结温差-湿差-历时	Frank	3.758	-686.524	0.046
	Clayton	1.268	-884.947	0.019		Clayton	1.203	-734.400	0.037
	Gumbel	1.386	-742.0361	0.036		Gumbel	1.457	-623.698	0.061
冻融温差-湿差	Frank	1.452	-825.850	0.025	冻融温差-湿差-历时	Frank	1.211	-689.677	0.046
	Clayton	0.433 1	-840.223	0.023		Clayton	0.294 2	-685.049	0.047
	Gumbel	1.093	-815.969	0.026		Gumbel	1.124	-661.015	0.052

绘制 F 和 FT 两种过程下各强度单一指数的二维联合分布函数等值线图, 见图 5。图 5 中所有联合分布的概率等值线变化趋势是相同的, 随着一个值的增大另一个值减少。F 的二维联合概率等值线由小到大变化时始终明显呈现出间距从紧密到宽松的特点, 概率等值线 0.1 与 0.3 之间最紧密; 而 FT 的等概率值间距则是从宽松到紧密再宽松, 概率等值线 0.3 与 0.5 之间最紧密。对于 F, 在温差 0~5℃、湿差 0~5%、历时 0~10 h 是联合概率等值线明显紧密的范围, 概率的变化率大; 对应 FT, 在温差 5~10℃、湿差 5%~10%、历时 5~15 h 的范围联合概率等值线明显紧密, 概率的变化率大。

3.3 强度评价结果

构建联合分布后, 计算各试验场中所有短历时冻融事件的强度综合指数值, 并从小到大排列编号为 1~224, 在最大与最小强度值 1~0 均匀划分为 3 档, 对强度值在 $1 \leq 0.666$ 、 $>0.666 \leq 0.333$ 、 $>0.333 \sim 0$ 的事件分别定义为强、中、弱事件, 并统计各地发生 3 种事件的次数, 绘制成百分比图 (图 6)。

同时统计所有事件强度的累加值、平均值、最大和最小值, 结果见表 5。

从 3 种事件组成分析, 弱等事件发生最少, F 和 FT 构建下各试验场中占比均不超过 15%, 表明以随机天气驱动的冻融事件总体发生少, 短历时冻融事件中以昼夜转换驱动的事件占主体。香茂乡中以发生中等事件居多; 那曲大桥中 F 构建下以强等居多, FT 构建下转变以中等居多; 其余两地均以强等居多。措玛乡中 3 种事件占比最趋于均衡; 而小唐古拉中的强等事件偏多、占比大, F 和 FT 构建下分别达 58%、50%, 该地受冻融影响更严重。

累加强度反映年内所有事件整体在水、热、时上的影响 (对应表 5 中的综合指数累加值)。F 和 FT 构建下均表明措玛乡中影响最大, 依次以香茂乡、小唐古拉、那曲大桥递减。两种过程下受影响最强的试验场约为最弱的 3.67 倍和 4.86 倍, 与事件发生的总次数差异明显有关; 平均强度反映年内发生单次事件在水、热、时影响上的集中趋势 (对应表 5 中的综合指数平均值)。

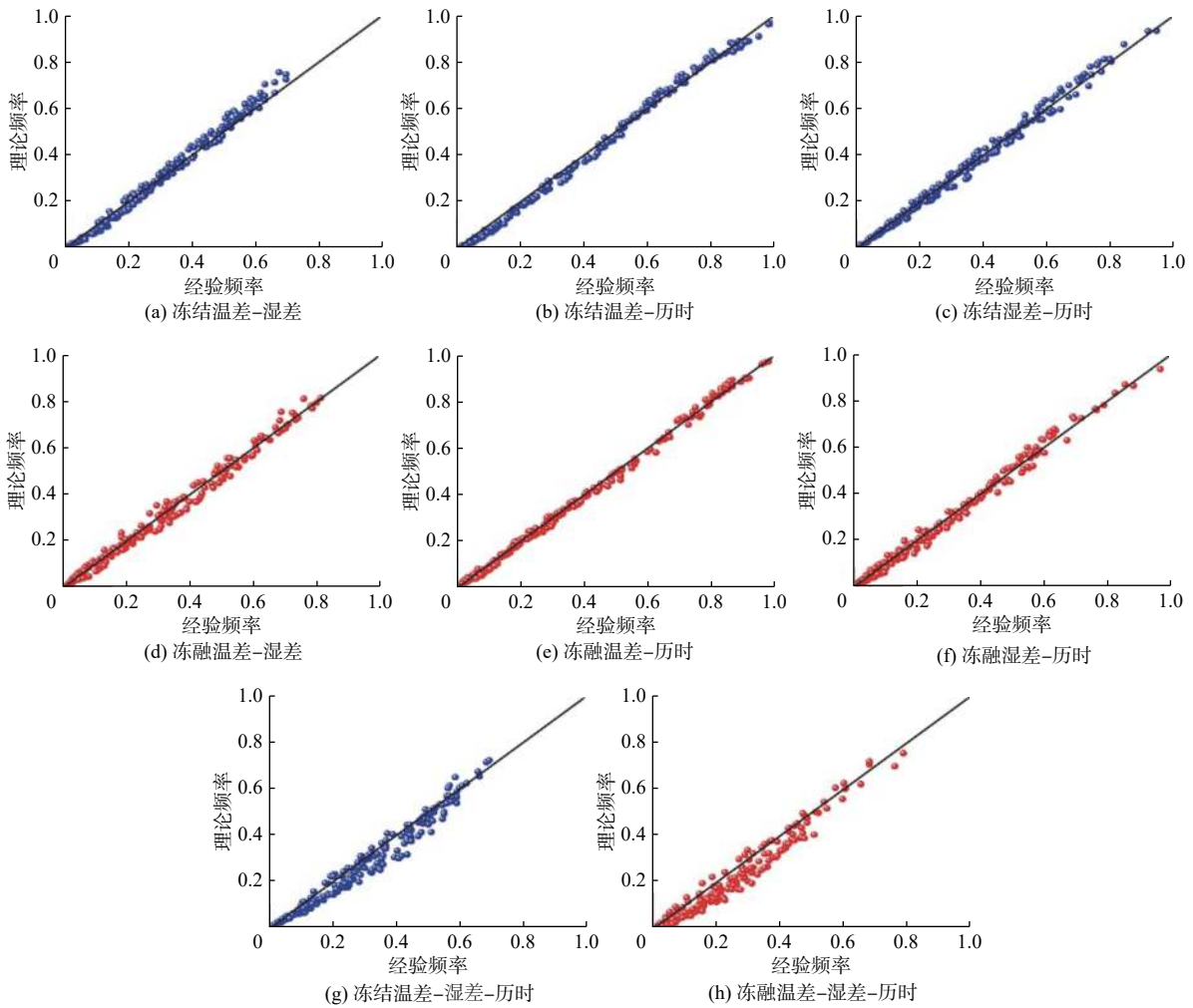


图 4 经验频率与理论频率拟合效果

Fig. 4 The fitting effect of empirical frequency and theoretical frequency

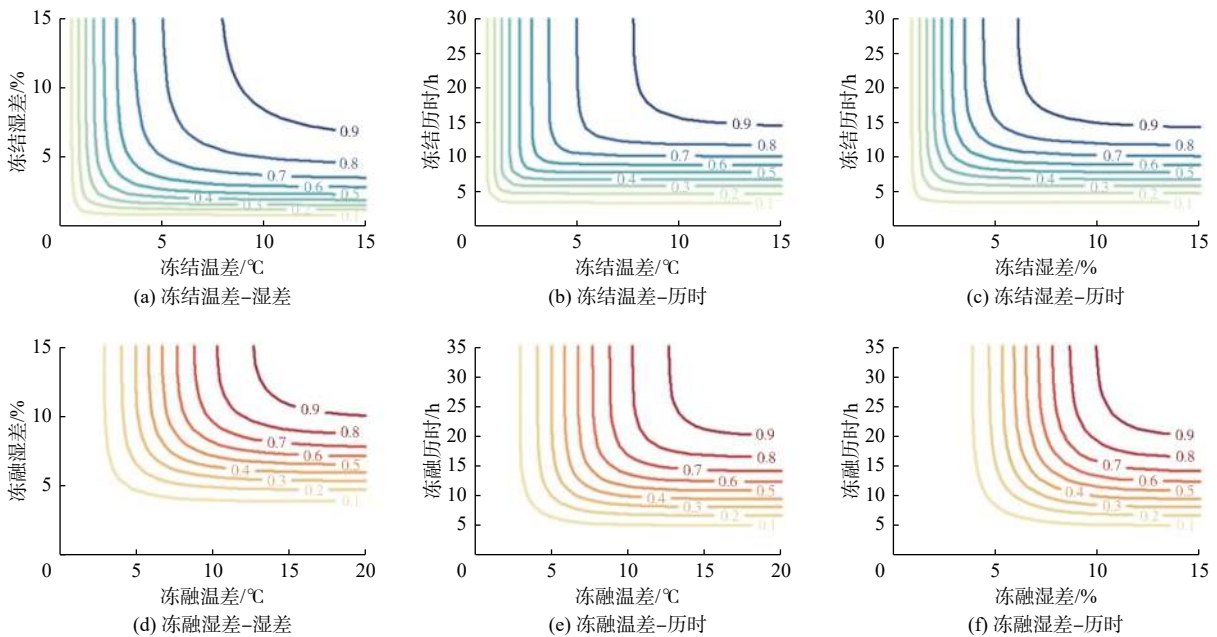


图 5 二维联合分布等值线

Fig. 5 Two-dimensional joint distribution contours

F 构建下平均强度以那曲大桥、小唐古拉、措玛乡、香茂乡递减。那曲大桥及小唐古拉的单次事件集中趋势在强等事件的范围,其余两地在中等事件范围。那曲大桥地理位置靠近河流,土壤天然含

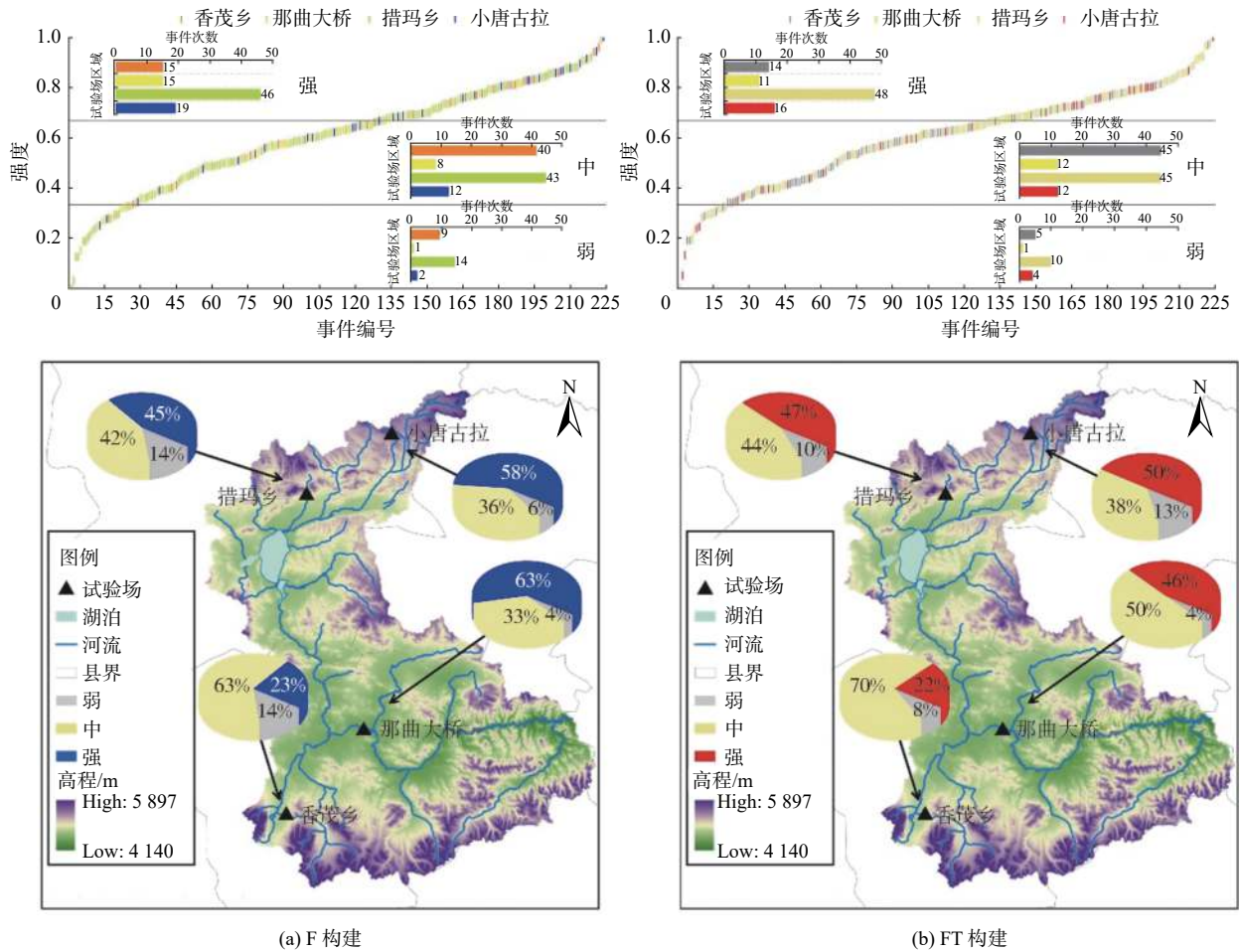


图 6 各试验场 3 种强度事件数量百分比
Fig. 6 Percentage of the number of three intensity events in each experimental field

表 5 各试验场强度综合指数
Tab. 5 Intensity composite index in each experimental field

构建过程	强度统计值		试验场			
			香茂乡	那曲大桥	措玛乡	小唐古拉
F	累加值	综合指数	35.044	16.649	61.028	22.559
		平均值	0.548	0.694	0.593	0.684
	最大值	综合指数	0.915	0.960	0.993	1.000
		发生日期	2020-02-18	2020-02-28	2019-12-01	2019-10-26
		对应 T_F, θ_F, t_F	5.5, 3.6, 16.9	5.2, 6.6, 12.7	8.8, 4.4, 15.4	4.3, 7.8, 20
		综合指数	0.151	0.277	0	0.250
	最小值	发生日期	2019-11-12	2020-03-24	2019-11-05	2020-05-10
		对应 T_F, θ_F, t_F	0.2, 1.2, 2.0	0.3, 2.4, 5.0	0.3, 0.3, 1.5	0.3, 1.0, 3.0
		综合指数	0.970	0.966	0.978	1.000
		发生日期	2020-03-08	2019-11-30	2019-12-01	2020-04-28
FT	累加值	综合指数	34.296	13.201	64.192	17.912
		平均值	0.536	0.550	0.623	0.543
	最大值	综合指数	0.970	0.966	0.978	1.000
		发生日期	2020-03-08	2019-11-30	2019-12-01	2020-04-28
		对应 $T_{FT}, \theta_{FT}, t_{FT}$	10.8, 9.2, 25.6	10.1, 12.9, 18.7	12.7, 8.9, 22.0	10.6, 14.6, 22.2
		综合指数	0.190	0.196	0	0.052
	最小值	发生日期	2019-11-30	2020-03-20	2019-11-05	2019-10-16
		对应 $T_{FT}, \theta_{FT}, t_{FT}$	1.8, 2.4, 8.9	1.7, 3.0, 6.1	2.1, 2.0, 2.3	0.6, 2.0, 7.0
		综合指数	0.970	0.966	0.978	1.000
		发生日期	2020-03-08	2019-11-30	2019-12-01	2020-04-28

水量高,冻结中湿度减少量多而致强度大,而小唐古拉海拔高则更易冻结时日长而致强度大;FT构建下变为措玛乡的平均强度最强,其余3地递减顺序不变,各地单次事件的集中趋势都在中等事件范围。

最大、最小强度是对极端事件在水、热、时影响上的衡量与把控。4个试验场相比,F和FT构建下小唐古拉的最大强度都更大,但对应两次不同的事件产生,发生日期分别在2019年10月26日和2020年4月28日,其中,冻结湿差可达7.8%,冻融湿差可达14.6%,见表5;同理F和FT构建下措玛乡的最小强度都更小,由同一次事件产生,发生日期在2019年11月5日,其中冻结历时仅1.5h,冻融历时仅2.3h。由最大强度反映出小唐古拉该地更易受到高强度甚至极端强度的冻融影响,而由最小强度则反映出措玛乡该地更易受随机天气的驱动下发生冻融。

综上所述还表明:怒江源区短历时冻融事件在强度特性上同样空间差异明显;对比两种构建过程,强度结果没有大体趋势上的相反、数值偏差不大(表5),但仍有所差别:一是F与FT下的最大(最小)强度事件发生日期不一定相同;二是香茂乡、那曲大桥、小唐古拉中,F比FT的累加及平均强度综合指数都更大一些,强等事件占比也更大。

3.4 评价结果讨论

冻融特性及其特征规律是多影响因素综合作用的结果。海拔对土壤冻融的影响较大^[25-27],总体决定了短历时冻融事件在区域间的出现时间顺序、总历时、总次数。海拔5000m以上区域(小唐古拉)总体气温更寒冷、4500m以下区域(那曲大桥)总体气温更暖和,在年内分别具有较长的完全冻结期、完全融化期,因而短历时冻融事件集中发生的冻结及融化过程期相对较短,使得冻融在历时、次数上明显减弱。坡度坡向对土壤接受太阳辐射总量和强度有影响,使得土壤获取热量不同而改变冻融发生特性。有研究^[28]表明冻融影响在0~3°的坡不敏感,3°~8°的坡轻度敏感,8°~15°的坡中度敏感,15°~90°的坡重度敏感,印证研究结果,坡度较高区域(措玛乡、香茂乡)发生事件次数更多,当坡度逐渐减缓时次数也逐渐变少(小唐古拉、那曲大桥)。坡向朝南与朝北对冻融特性也具有影响^[29],但还需进一步增设实验完善研究。土壤物理性质与冻融特性(强度)有着直接影响,研究^[30]表明土壤砂粒含量增多,减少了孔隙率,与本文检测结果一

致。当土壤孔隙率减少,空气越少,土壤导热率越大^[31],因而热量易传递不易储存,使得5cm土层温度变化缓和导致平均强度小。同时,砂粒含量多,土壤蓄、持水能力低^[32]也使得湿度变化缓和导致平均强度小(香茂乡)。5cm以下土壤层的性质、积雪及植被覆盖、人类活动等对表层土壤冻融特性的呈现也具有一定影响,但仍需进一步调查与增设对照实验,细化和完善研究结果。

结果显示F比FT构建下的强度综合指数有所增大,表明在冻结过程的基础上加入融化过程后强度反被削弱,故而体现冻结和融化过程并不是完全等效应的,融化过程产生的强度效应不及冻结过程产生的强度效应。讨论产生这种现象的几点可能原因:冻结是一个较慢的过程^[33],青藏高原土壤冻融存在常见的冻结历时长于融化历时的现象^[34];短历时冻融事件频发的月份整体气温偏低,一日之中土温小于0℃的时间较长,土壤微弱增温融化后又快速大幅降温被冻结;频繁反复的冻融使得水分迁移^[35],观测到土壤减湿多于增湿。

由于定义土壤冻结和融化的状态存在许多不同的见解^[36],同时青藏高原环境恶劣导致仪器易发生故障、开展实验困难,使评价结果不可避免存在一定的误差和特殊性,还需进一步优化方法、增多实验点和实验频次来证明和提高评价结果的准确性和普遍性。

4 结论

以怒江源区表土频发的短历时冻融事件为研究对象,从事件5个特性层面形成评价内容,阐明事件特性在源区的特征规律。基于评价结果及讨论提炼以下结论:

怒江源区季节冻土中,短历时冻融事件特性在不同空间位置上具有差异,表现在起止时间、历时、次数、频率、强度上均有很大不同,且差异性由多因素共同影响下形成。总体特性随海拔位置呈现出如下的特征规律:在入冬前事件以高海拔区向低海拔区依次开始发生,来年入夏前以低海拔区向高海拔区依次结束;4500~5000m中海拔区的事件比4500m以下低海拔区和5000m以上高海拔区的事件总历时更长、总次数更多、循环频率更高、累加强度更大。

高频的短历时冻融事件发生,能够不断聚集冻融过程中产生的水热影响,极大促进土壤结构等性

质的改变;而高强甚至极端强度的短历时冻融事件发生,则直接放大了这种水热影响,产生骤变土壤性质、灭绝生物活性的危害。怒江源区措玛乡、小唐古拉等北部区域土壤分别受冻融频率、最大强度的影响更严重,应更注重土壤冻融的监测和防治。

冻结过程 F 和冻融过程 FT 是两种强度效应不同的过程,分别构建后的强度综合指数呈现一定差异。冻结强度整体高于冻融强度,融化过程在水、热、时的变化程度上不及冻结过程,强度有所削弱。

参考文献(References):

- [1] MIURA M, HILL P W, JONES D L. Impact of a single freeze-thaw and dry-wet event on soil solutes and microbial metabolites[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 153: 1-4. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103636.
- [2] MONSON L. Plant-microbe competition for soil amino acids in the alpine tundra: Effects of freeze-thaw and dry-rewet events[J]. *Oecologia*, 1998, 113(3): 406-414. DOI: 10.1007/s004420050393.
- [3] 梁川, 赵莉花, 张博雄. 长江江源高寒地区气候变化对水文环境影响研究综述[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(1): 81-86. (LIANG C, ZHAO L H, ZHANG B X. Effects of climate change on hydrological environment in the extremely frigid zone of the source region of Yangtze River[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(1): 81-86. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.01081.
- [4] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(9): 924-931. (YAO T D, CHEN F H, CUI P, et al. From Tibetan Plateau to third pole and pan-third pole[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(9): 924-931. (in Chinese)) DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2017.09.001.
- [5] ZOU D, LIN Z, YU S, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(6): 2527-2542. DOI: 10.5194/tc-11-2527-2017.
- [6] 满子豪, 翁白莎, 杨裕恒, 等. 青藏高原冻融过程期划分及发展趋势研究[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(7): 16-19. (MAN Z H, WENG B S, YANG Y H, et al. Study on division and development trend of freezing-thawing process period in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(7): 16-19. (in Chinese))
- [7] 满子豪. 那曲流域高寒草甸应对冻融事件的监测研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020. (MAN Z H. Monitoring study on alpine meadow response to freezing-thawing events in the Nagqu River basin[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020. (in Chinese))
- [8] GUO D, WANG H. Simulated change in the near-surface soil freeze/thaw cycle on the Tibetan Plateau from 1981 to 2010[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(20): 2439-2448. DOI: 10.1007/s11434-014-0347-x.
- [9] WANG G, HU H, LI T. The influence of freeze-thaw cycles of active soil layer on surface runoff in a permafrost watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(3-4): 438-449. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.046.
- [10] XIE S B, QU J J, LAI Y M, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(4): 999-1009. DOI: 10.1007/s11629-014-3384-7.
- [11] 杨梅学, 姚檀栋, HIROSE N, et al. 青藏高原表层土壤的日冻融循环[J]. *科学通报*, 2006(16): 1974-1976. (YANG M X, YAO T D, HIROSE N, et al. The daily freeze-thaw cycle of the surface soil on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006(16): 1974-1976. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2006.16.020.
- [12] 陈瑞, 杨梅学, 万国宁, 等. 基于水热变化的青藏高原土壤冻融过程研究进展[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(11): 1944-1958. (CHEN R, YANG M X, WAN G N, et al. Soil freezing-thawing processes on the Tibetan Plateau: A review based on hydrothermal dynamics[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(11): 1944-1958. (in Chinese)) DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.11.014.
- [13] 蔡林彤, 方雪薇, 吕世华, 等. 青藏高原中部冻融强度变化及其与气温的关系[J]. *高原气象*, 2021, 40(2): 244-256. (CAI L T, FANG X W, LYU S H, et al. Analysis on the changes of soil freezing and thawing process and its relationship with air temperature in the central Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(2): 244-256. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00073.
- [14] 盛乃宁, 鞠琴, 顿珠加措, 等. 黄河源区冻土变化特征及其与温度的关系[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(5): 843-852. (SHENG N N, JU Q, Dunzhujiacuo, et al. Permafrost variation characteristics and its relationship with temperature in Yellow River[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(5): 843-852. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0088.
- [15] 魏霞, 李勋贵, HUANG C H. 交替冻融对坡面产流产沙的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 157-

163. (WEI X, LI X G, HUANG C H. Impacts of freeze-thaw cycles on runoff and sediment yield of slope land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(13): 157-163. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.13.022.
- [16] 肖东辉, 冯文杰, 张泽, 等. 冻融循环对兰州黄土渗透性变化的影响[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1192-1198. (XIAO D H, FENG W J, ZHANG Z, et al. Research on the Lanzhou loess's permeabilities changing with freezing-thawing cycles[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1192-1198. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0142.
- [17] 姚甜甜, 聂晓刚, 张鹏, 等. 冻融作用对藏东南高寒区土壤容重、孔隙度的影响[J]. *高原农业*, 2020, 4(4): 386-391. (YAO T T, NIE X G, ZHANG P, et al. Effects of freeze-thaw on soil bulk density and porosity in alpine region of southeastern Tibet[J]. *Journal of Plateau Agriculture*, 2020, 4(4): 386-391. (in Chinese)) DOI: 10.19707/j.cnki.jpa.2020.04.010.
- [18] 常丹, 刘建坤, 李旭, 等. 冻融循环对青藏粉砂土力学性质影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1496-1502. (CHANG D, LIU J K, LI X, et al. Experiment study of effects of freezing-thawing cycles on mechanical properties of Qinghai-Tibet silty sand[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1496-1502. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2014.07.023.
- [19] 张迎, 黄生志, 黄强, 等. 基于Copula函数的新型综合干旱指数构建与应用[J]. *水利学报*, 2018, 49(6): 703-714. (ZHANG Y, HUANG S Z, HUANG Q, et al. Construction and application of a new comprehensive drought index based on Copula function[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(6): 703-714. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20171207.
- [20] 李军, 吴旭树, 王兆礼, 等. 基于新型综合干旱指数的珠江流域未来干旱变化特征研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(4): 486-497. (LI J, WU X S, WANG Z L, et al. Changes of drought characteristics in future in Pearl River basin describing by a new comprehensive standardized drought index[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4): 486-497. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200320.
- [21] 陈子燊, 黄强, 刘曾美. 基于非对称Archimedean Copula的三变量洪水风险评估[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 763-771. (CHEN Z S, HUANG Q, LIU Z M. Risk assessment of trivariate flood based on asymmetric Archimedean Copulas[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5): 763-771. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.05.014.
- [22] 刘章君, 郭生练, 许新发, 等. Copula函数在水文水资源中的研究进展与述评[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 148-159. (LIU Z J, GUO S L, XU X F, et al. Application of Copula functions in hydrology and water resources: a state-of-the-art review[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 148-159. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.01.015.
- [23] 官博亚. 基于自然地理特征的那曲流域水源解析[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. (GONG B Y. Geomorphic-centered analysis of water source in Naqu River basin, Qinghai-Tibetan Plateau, China[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019. (in Chinese))
- [24] 林笠, 王其兵, 张振华, 等. 温暖化加剧青藏高原高寒草甸土非生长季冻融循环[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1): 171-178. (LIN L, WANG Q B, ZHANG Z H, et al. Warming enhances soil freezing and thawing circles in the non-growing season in a Tibetan alpine grassland[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53(1): 171-178. (in Chinese)) DOI: 10.13209/j.0479-8023.2016.121.
- [25] LI X, JIN R, PAN X, et al. Changes in the near-surface soil freeze-thaw cycle on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17(1): 33-42. DOI: 10.1016/j.jag.2011.12.002.
- [26] WANG K, ZHANG T, ZHONG X H, et al. Changes in the timing and duration of the near-surface soil freeze/thaw status from 1956 to 2006 across China[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(3): 1321-1331. DOI: 10.5194/tc-9-1321-2015.
- [27] PENG X Q, FRAUENFELD O W, CAO B, et al. Response of changes in seasonal soil freeze/thaw state to climate change from 1950 to 2010 across China[J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2016, 121: 1984-2000. DOI: 10.1002/2016jg003876.
- [28] 王莉雁, 肖焱, 江凌, 等. 青藏高原冻融侵蚀敏感性评价与分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 61-69. (WANG L Y, XIAO Y, JIANG L, et al. Assessment and analysis of the freeze-thaw erosion sensitivity on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 61-69. (in Chinese))
- [29] 兰爱玉, 林战举, 范星文, 等. 青藏高原原麓河多年冻土区阴阳坡地表能量和浅层土壤温湿度差异研究[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(9): 962-979. (LAN

- A Y, LIN Z J, FAN X W, et al. Differences of surface energy and shallow soil temperature and humidity at sunny and shady slopes in permafrost region, Beiluhe basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(9): 962-979. (in Chinese) DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.081.
- [30] 潘永洁, 吕世华, 高艳红, 等. 砾石对青藏高原土壤水热特性影响的数值模拟[J]. *高原气象*, 2015, 34(5): 1224-1236. (PAN Y J, LYU S H, GAO Y H, et al. Simulation of influence of gravel on soil thermal and hydraulic properties on Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2015, 34(5): 1224-1236. (in Chinese)) DOI: CNKI:SUN:GYQX.0.2015-05-004.
- [31] 何玉洁, 宜树华, 郭新磊. 青藏高原含砂砾石土壤导热率实验研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(2): 343-350. (HE Y J, YI S H, GUO X L. Experimental study on thermal conductivity of soil with gravel on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(2): 343-350. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0039.
- [32] 李卓, 冯浩, 吴普特, 等. 砂粒含量对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 204-208. (LI Z, FENG H, WU P T, et al. Simulated experiment on effects of soil clay particle content on soil water holding capacity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 204-208. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2009.03.044.
- [33] 王澄海, 师锐, 左洪超. 青藏高原西部冻融期陆面过程的模拟分析[J]. *高原气象*, 2008(2): 239-248. (WANG C H, SHI R, ZUO H C. Analysis on simulation of characteristic of land surface in western Qinghai-Xizang Plateau during frozen and thawing[J]. *Plateau Meteorology*, 2008(2): 239-248. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2007.01.012.
- [34] 张海宏, 肖宏斌, 祁栋林, 等. 青藏高原湿地土壤冻结、融化期间的陆面过程特征[J]. *气象学报*, 2017, 75(3): 481-491. (ZHANG H H, XIAO H B, QI D L, et al. Features of land surface process over wetland at Tibetan Plateau during soil freezing and thawing periods[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2017, 75(3): 481-491. (in Chinese)) DOI: 10.11676/qxb2017.034.
- [35] 焦永亮, 李韧, 赵林, 等. 多年冻土区活动层冻融状况及土壤水分运移特征[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(2): 237-247. (JIAO Y L, LI R, ZHAO L, et al. Processes of soil thawing-freezing and features of soil moisture migration in the permafrost active layer[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 237-247. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0030.
- [36] 杜军, 周刊社, 次旺顿珠. 羌塘国家级自然保护区地表土壤冻结天数时空变化特征[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1121-1129. (DU J, ZHOU K S, Ciwangdunzhu. Spatial and temporal variations of surface soil freezing days in Chang Tang Natural Reserve of Tibet during 1981-2018[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(4): 1121-1129. (in Chinese)) DOI: 10.13292/j.1000-4890.202004.030.

Evaluation for short-duration freeze-thaw events of seasonally frozen soil in the headstreams of Nujiang River

ZHOU Wei^{1,2}, WENG Baisha^{2,3}, YAN Denghua^{2,3}, LUAN Qinghua⁴

(1. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research(IWHR), Beijing 100038, China; 3. Yinshanbeilu National Field Research Station of Steppe Eco-hydrological System, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot 010020, China; 4. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Seasonally frozen soil is widely distributed in Qinghai-Tibet Plateau and soil freeze-thaw events occur frequently in the headstream of Nujiang River. Due to the large altitude difference and the asynchrony of meteorological changes between different regions in the headstream region, the occurrence of freeze-thaw events has different characteristics and certain regularities in time and space.

To explore the characteristics of freeze-thaw in seasonally frozen soil, the short-duration freeze-thaw events that occurred in the 5 cm surface soil of 4 typical experimental fields of the headstream region were selected. The connotation of the short-duration freeze-thaw events was clarified and a specific identification method for these events was proposed. The characteristics of events were evaluated and the evaluation was formed by five aspects:

The start and end time, the total duration, the total number of times, the cycle frequency, and the intensity. In the intensity evaluation, the Copula function method was used to combine three single indexes of temperature difference, humidity difference, and duration to construct a more comprehensive and efficient comprehensive index, and the two different processes of freeze and freeze-thaw are evaluated separately.

The evaluation results showed that from September 1, 2019, to August 31, 2020, the short-duration freeze-thaw events in the 4 typical experimental fields had a maximum difference of 45 days in the start time and 64 days in the end time. The maximum difference in the total duration, the total number of times and the cycle frequency can reach 112 days, 79 times, and 0.058 times/day, respectively. The maximum difference in the cumulative intensity and the maximum intensity can reach 50.991 and 0.034 for the freezing process, 50.991 and 0.034 for the freeze-thaw process.

The characteristics of short-duration freeze-thaw events in different geographical locations in the headstream of Nujiang River are different. The events in the middle-altitude area (4 500 - 5 000 m.a.s.l.) showed regularity with a longer total duration, higher total number of times, cycle frequency, and accumulation intensity than the events in the low-altitude area (< 4500 m.a.s.l.) and the high-altitude area (> 5 000 m.a.s.l.). High-frequency or high-intensity events can greatly affect or even destroy the soil environment. In this regard, more attention should be paid to freeze-thaw monitoring and protection in the northern part of the basin. Freeze and freeze-thaw were two processes with different intensity effects, and evaluated respectively can avoid the problem of weakened strength. The results are conducive to clarifying the freeze-thaw characteristics of seasonally frozen soil in the plateau alpine region, and reflecting the impact of short-duration freeze-thaw events, providing support for water and soil conservation, frost heaving, thaw collapsing hazards prevention and control in the headstream.

Key words: seasonal frozen soil; freeze-thaw event; Copula function; headstreams of Nujiang River