

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0041

QIN Haiqin, ZHANG Ping, ZHAN Xiuli, et al. Spatial and temporal differences of freeze-thaw processes on dunes in the East Desert of the Yellow River in Ningxia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):909-918. [秦海琴, 张萍, 展秀丽, 等. 宁夏河东沙地沙丘冻融过程的时空差异[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):909-918.]

宁夏河东沙地沙丘冻融过程的时空差异

秦海琴^{1,2}, 张萍¹, 展秀丽², 火占华¹, 马娟利¹, 吴宏玥¹, 靳磊¹

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学资源环境学院, 宁夏银川 750021)

摘要: 中国的沙漠和沙地部分或全部分布在季节冻土区, 研究沙丘的冻融过程是讨论季节冻结期间沙丘风蚀和形态演变规律的条件之一。以宁夏河东沙地流动沙丘和沙障固定沙丘为研究对象, 通过野外观测和室内控制实验, 分析了沙丘的冻融过程及其控制因素。结果显示: 沙丘的冻结期在11月中旬至3月上旬, 流动沙丘各地貌部位的冻结时长和冻结层厚度均存在较大差异(背风坡面>迎风坡面>丘顶), 背风坡脚的冻深最大。在季节冻结期内沙丘表层始终不发生冻结, 未冻层厚度的阈值约为10 cm且具有保护冻结层的作用, 流动沙丘迎风坡中在未冻层风蚀后, 地表冻结层融化再被风蚀, 如此循环过程造成其冻结层厚度远小于沙障固定沙丘的冻结层厚度。流动沙丘丘顶和背风坡面的冻结层厚度分别受短时(32 h)和较长历时(15 d)平均气温的影响。野外观测和室内控制实验均证明水分含量低于1.6%的沙丘沙不发生冻结, 冻结层硬度随含水率的增加呈幂函数递增($P<0.001$), 随温度降低呈缓慢递增。

关键词: 季节冻土; 冻结期; 沙丘冻结; 宁夏河东沙地

中图分类号: S152.7; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0909-10

0 引言

冬季含冰冻结、夏季全部融化的岩土被称为季节冻土, 包括季节冻结层和季节融化层。长江以北地区均有季节冻土分布, 占中国陆地总面积的74%^[1]。季节冻土的冻融过程伴随着土壤物理状态的改变, 相应地土壤的冻结深度、含水率、温度也随之发生变化^[2-3]。叠加分析《中国季节冻土标准冻深线图》与《中国沙漠分布图》发现, 中国的沙漠(地)几乎全部分布在季节冻土区。季节冻土对气候变化的响应较为敏感, 近50年来在全球变暖背景下, 中国季节冻土表现为最大冻土深度减小, 冻结日期推迟, 融化日期提前, 结冻期缩短的退化趋势^[3-6]。季节冻土的第一个冻结日平均推迟(10 ± 1) d, 最后一个冻结日平均推迟(18 ± 2) d, 最大冻结深度降低了(20 ± 3) cm^[7]。以往的研究表明, 沙地和

沙丘不同深度及不同地貌部位的冻结时长有较大差异, 科尔沁沙地整体冻结时长为39~104 d, 冻融过程的发生深度为0~100 cm, 冻融循环主要发生在0~50 cm深度^[8]; 巴丹吉林沙漠年冻结时间长达4个月, 沙丘背风坡和迎风坡的冻结深度显著大于丘间地^[9]。季节冻土的存在影响着沙丘表面的水分分异格局, 冻结期沙丘水分分布为丘间地>坡面>丘顶^[10], 地温随深度增加而升高, 但变化幅度随深度的增加而衰减^[11-12]。

季节冻土的冻融过程既控制风蚀又促进风蚀, 秋季表面沙粒开始冻结时, 临界起沙风速增大, 直至冬季中期达到最大, 次年春季则又逐渐减小^[13]; 冻结表面发生扬尘的风速($15.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)高于解冻表面发生扬尘的风速($12.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 由此推测冬季沙粒冻结可能会降低风沙活动的强度^[13-15]。春季解冻时期沙层经历冻融循环, 沙粒间的黏聚力减弱^[16-17], 抗

收稿日期: 2019-11-11; 修订日期: 2020-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761001)资助

作者简介: 秦海琴(1995-), 女, 甘肃平凉人, 2017年在西北师范大学获学士学位, 现为宁夏大学在读硕士研究生, 从事风沙地貌研究. E-mail: 18895086372@163.com

通信作者: 张萍, 副教授, 从事风沙地貌和荒漠化防治研究. E-mail: zp2009@mail.bnu.edu.cn.

风力下降^[18]。中国北方季节冻土广布,春季大风事件频发,同时也是土壤解冻期,大风频发时段与冻结时段的重叠时长可能直接影响春季风沙活动的历时和强度。冻融过程对风蚀产生影响,但研究内容较少,有必要深入开展相关研究工作。

本文选取宁夏河东沙地的流动沙丘和沙障固定沙丘,通过挖取剖面定期观测沙丘不同坡位的冻结起止日期、冻结深度,冻土层的水分、温度和硬度,分析流动沙丘不同坡位的冻结时长、冻结层的时空变化,并与沙障固定沙丘进行对比分析,揭示冻结层厚度及硬度与气温、土壤温度、土壤水分间的关系,为进一步研究季节冻结期内风沙活动强度的控制因子,以及模拟和预测中国北方沙丘形态动力学特征对气候变化的响应提供基础资料。

1 研究区概况

研究区位于宁夏灵武市白芨滩(37°49′~38°20′ N、106°30′~106°37′ E)和宁夏盐池县北部与内蒙古鄂托克前旗南部交界处(36°00′~37°56′ N、107°27′~107°28′ E),两地均属于毛乌素沙地边

缘、鄂尔多斯台地西南缘。地貌以起伏的流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘为主,沙丘类型多为新月形沙丘(链)和梁窝状沙丘,部分区域有抛物线形沙丘和灌丛沙堆^[19],其中流动沙丘(无人干扰)分布在灵武市白芨滩,固定沙丘(固定措施为枯枝菱形平铺沙面)分布在两省区交界处的样地。

研究区海拔1 150~1 650 m,气候类型为温带大陆性气候,年均气温6.2~8.8℃,年均降水量198.9 mm,年均蒸发量1 928.4 mm,近50年来最大季节冻土深度均值为54.8~107.7 cm^[17-19]。2016-2019年冻结期(11月至次年3月)内灵武市和盐池县的平均气温分别为-2.5℃和-4.5℃,1月平均气温分别为-7.6~-1.7℃和-6.7~-6.4℃,最低气温分别达到-21.9℃和-21.7℃。研究区内的沙丘沙以细沙为主,占比在70%以上,中沙和极细沙的占比在25%左右,基本不含其他粒径级(表1)。灵武市2016-2019年冻结期的主风向为SSW,次风向为W、WNW、S[图1(a)];盐池县2017-2019年冻结期的主风向为W,次风向为WSW、WNW、NNE[图1(b)]。

表1 研究区沙丘沙的机械组成(单位: %)

深度/cm	粗沙	中沙	细沙	极细沙	粉沙	黏土
	(2~0.5 mm)	(0.5~0.25 mm)	(0.25~0.1 mm)	(0.1~0.05 mm)	(0.05~0.002 mm)	(<0.002 mm)
0~10	0	12.91	72.61	13.98	0.5	0
10~20	0	15.62	73.82	10.53	0	0
20~30	0	15.44	73.89	10.67	0	0
30~40	0	22.04	72.00	5.96	0	0

注:粗沙、中沙……黏土下方圆括号内的数值为粒径范围。

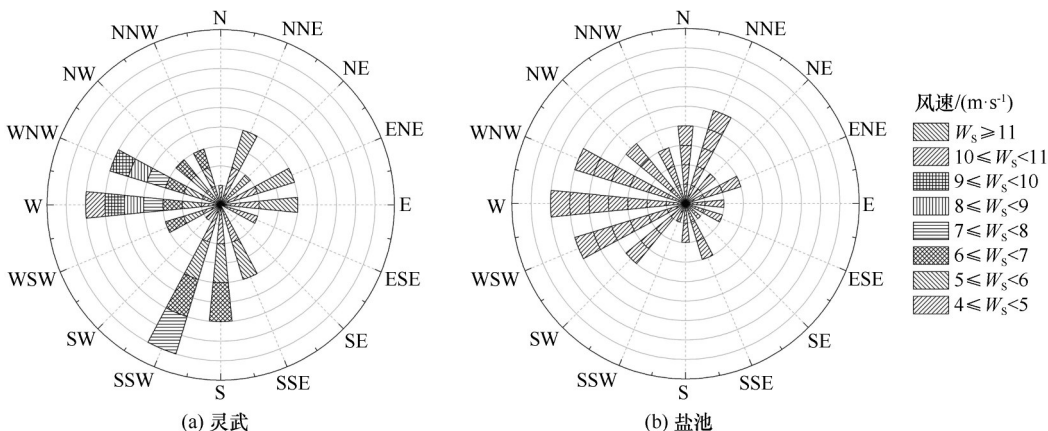


图1 研究区冻结期风向频率

Fig. 1 Rose graphs of frequency of wind direction during freezing period in Lingwu (a) and Yanchi (b)

2 数据与方法

2.1 野外观测

2018年1月31日和2月1日分别在灵武市白芨滩和宁夏内蒙交界处S216省道东侧,选取无人为干扰的流动沙丘和沙障固定的沙丘各2个,两类沙丘的整体走向均为WNW – ESE; 2018年12月17日、2019年1月4日、2019年1月30日、2019年2月17日,在灵武市白芨滩选取无人为干扰的流动沙丘3个,完成以下测量内容:在沙丘的迎风坡脚、迎风

坡中、丘顶、背风坡中、背风坡脚分别挖1~2个剖面,深度至冻结层以下,测量地表未冻层和冻结层的深度范围,并在剖面上自地表往下以10 cm的间隔测量剖面上的温度、硬度(图2),温度和硬度的测量分别采用插入式直角地温计(测温范围-20~50℃,精度0.5℃)和规格为 $\phi 22.17\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 圆锥体探头的土壤坚实度仪,土壤坚实度仪测定的数值再根据说明书附表换算出实际硬度值。同时自地表往下每10 cm采集深度区间的土样,带回实验室用烘干法测含水率。

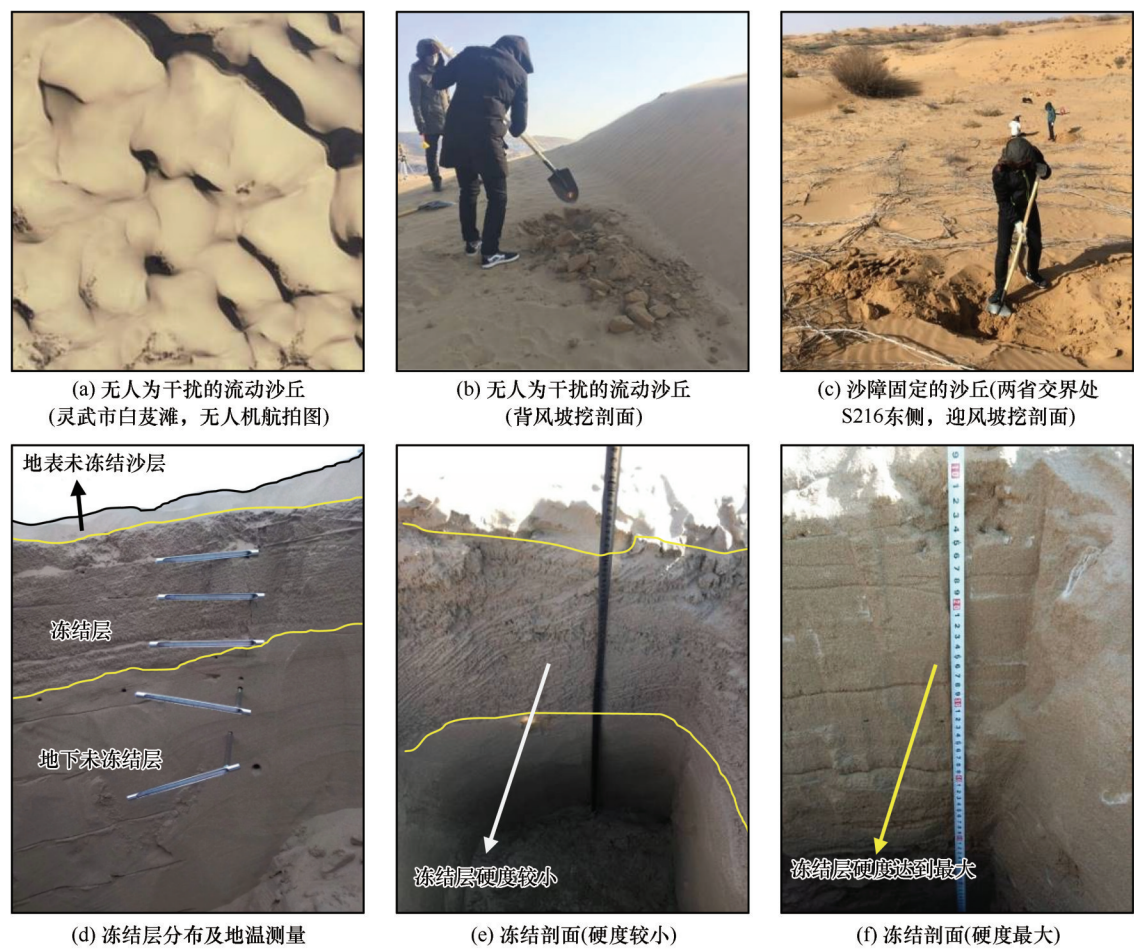


图2 两类沙丘在冻结期内的局部地表和剖面特征

Fig. 2 Characteristics of surface and profile of the two types of dunes during freezing period

2.2 室内实验

在灵武市白芨滩流动沙丘取沙丘沙,并对其进行除杂、烘干预处理后,取12个矿泉水瓶,分别称取600 g沙丘沙装入矿泉水瓶备用。设定12个梯度的含水率:1.0%、1.1%、1.2%、1.4%、1.6%、1.7%、2.0%、2.4%、3.0%、3.5%、4.0%、4.3%,通过烘干法的公式计算出各预设梯度的600 g干沙

所用水量,将计算量的蒸馏水加入矿泉水瓶中,充分摇匀。每个梯度取2个铝盒和2个750 mL的塑料盒,取100 g摇匀的沙土均分后放入2个铝盒并置于烘箱中,用烘干法测定实际含水率,其余沙土均分后分别放入塑料盒用保鲜膜密封并盖紧,置于温度可调节的超低温冰箱(美菱BCD-65WDGB,最低温可达-80℃)。冰箱的初始温度

设置为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，此后每隔 12 h 取出冰箱中的塑料盒，观察沙土是否冻结，对已冻结的沙土利用土壤坚实度仪测定硬度(仪器与野外观测所用一致)，直至硬度恒定。再将超低温冰箱的温度调为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，方法同上测量硬度直至恒定，之后 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的沙土硬度测定方法也同上。文中分析冻结硬度与温度和含水率的关系时，所用含水率为用烘干法测定的实际含水率，而非预设定的含水率梯度值。

2.3 其他数据来源

研究区粒度特征采用马尔文激光仪测定,文中使用的气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)与国际交换气象站(<https://rp5.ru>),前者的数据采集时间间隔为1 h,后者为3 h,白芨滩的气象数据用灵武站(编号53617),盐池县与鄂托克前旗交界处的数据用盐池站(编号53723)。文中数据分析采用Excel 2010,绘图采用Excel 2010、Origin 9.0和Coreldraw 14,部分图所采用的数据具体见图注或文字说明。

3 结果与分析

3.1 沙丘各部位冻融过程的空间差异

3.1.1 沙丘各部位冻结期及冻结时长的差异

通过人工观测结合气象数据(2016年11月至2019年3月的结冻期),分析确定灵武市白芨滩的流动沙丘各部位冻结期起止日及冻结时长,结果如表2所示。沙丘冻结的初始日期在11月,冻结的结束日期在2月中旬至3月上旬,不同年份冻结的起始、结束日期因气温差异而有所不同,沙丘不同部位在同一年份的冻结起止日和冻结时长也存在差异。以主导风向确定沙丘部位,沙丘各部位的冻结时长由大到小依次为:背风坡脚>背风坡中>迎风坡中>迎风坡脚>丘顶。

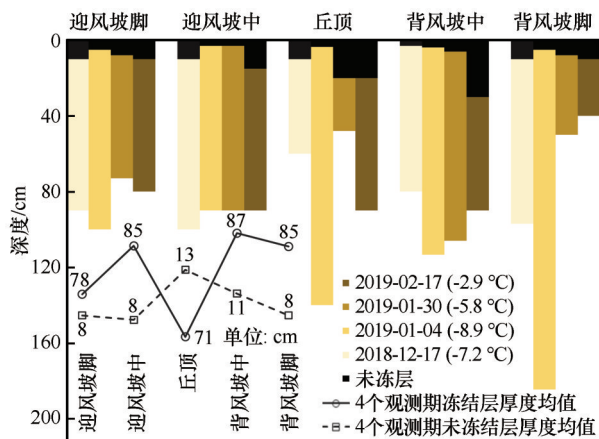
表2 宁夏河东沙地流动沙丘不同地貌部位的冻结期
Table 2 Freezing periods in various places of mobile dunes in a desert in the East Desert of the Yellow River in Ningxia

沙丘部位	冻结的初始日期	冻结的结束日期	冻结时长/d
迎风坡脚	11月下旬至12月上旬	2月中下旬	70~90
迎风坡中	11月中下旬	2月中下旬	80~95
丘顶	11月下旬至12月上旬	2月上中旬	60~85
背风坡中	11月中下旬	2月中下旬	90~100
背风坡脚	11月下旬	2月下旬至3月上旬	95~110

注：根据2016-2019年观测值统计后得出。

3.1.2 流动沙丘各部位冻结层深度的差异及其与气温的关系

图3为灵武白芨滩样地内流动沙丘各部位未冻层和冻结层在4个观测日的深度分布范围(柱状图),以及冻结层的平均厚度(折线图)。2018年12月中旬至2019年2月中旬,沙丘背风坡中、背风坡脚和迎风坡中的冻结层平均厚度最大,达到85 cm以上,其次为迎风坡脚,丘顶的冻结层厚度最小。沙丘各部位地表未冻层的平均深度在8~13 cm之间(图中黑色柱),丘顶的地表未冻层平均厚度最大(见图内的折线图)。同时在冻结期内随时间的推移,背风坡(坡中、坡脚)表现为冻结层深度先增后减,1月上旬达到最深,迎风坡中的基本不变,迎风坡脚和丘顶的变化规律一致,但丘顶的冻结层最不稳定。



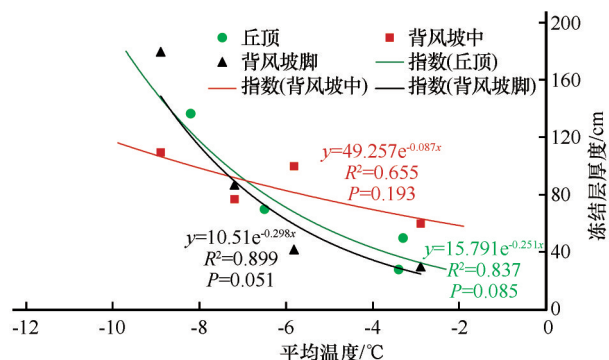
注：日期后的温度是观测日前 15 d 的平均气温，折线为沙丘不同部位未冻层和冻结层的平均厚度

图3 流动沙丘各地貌部位未冻层和冻结层的深度范围
Fig. 3 Depth ranges of unfrozen layer and frozen layer of various geomorphic sites on a mobile dune

对迎风坡脚、迎风坡中、丘顶、背风坡中、背风坡脚的冻结层厚度与冻结前 24 h、32 h、48 h、3 d、7 d、10 d、15 d 的平均气温分别做了相关性拟合,部分结果如图 4 所示。丘顶的冻结层厚度与短时(32 h)平均气温间存在指数函数关系,但未达到显著水平;背风坡中和背风坡脚的冻结层厚度与较长历时(15 d 内)的平均气温间分别存在对数函数关系(无显著相关性)和指数函数关系(有显著相关性);迎风坡(坡脚、坡中)冻结层厚度和气温间无明显的相关关系。

3.1.3 流动沙丘和沙障固定沙丘冻结层及地表未冻层的空间差异

2018年1月31日和2月1日分别在两类沙丘

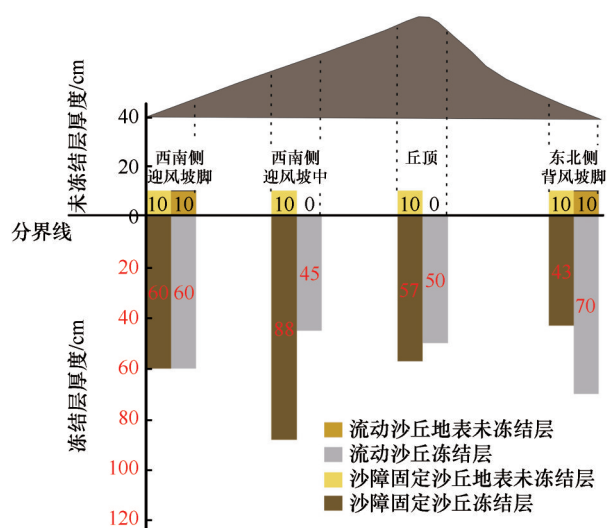


注: 气温数据为观测日前 32 h (丘顶) 的平均气温与前 15 d (背风坡中和背风坡脚) 的平均气温

图 4 流动沙丘不同地貌部位冻结层厚度与平均气温的关系图

Fig. 4 The relationship between the average air temperature and frozen depth for various geomorphic sites on a mobile dune

观测冻结层及未冻层的深度分布范围, 结果如图 5 所示。沙障固定的沙丘各观测部位的地表未冻结层厚度均为 10 cm, 流动沙丘的迎风坡脚和背风坡脚的未冻层厚度也是 10 cm, 但迎风坡中和丘顶的地表未冻层厚度为 0 cm。两类沙丘西南侧迎风坡脚的冻结层深度完全一致 (60 cm), 丘顶的也较为相近, 但迎风坡中和背风坡脚的冻结层深度差异较大。沙障固定沙丘的迎风坡中冻结层深度几乎为流动沙丘迎风坡中的 2 倍, 而流动沙丘背风坡脚的冻结层深度远大于沙障固定沙丘背风坡脚的。



注: 纵坐标红色数字表示冻结层厚度, 黑色数字表示未冻层厚度

图 5 流动沙丘和沙障固定沙丘冻结层及地表未冻层的空间差异

Fig. 5 Spatial differences of frozen layer and unfrozen layer between mobile dune and fixed dune by barriers

3.2 流动沙丘冻结层硬度、水分和地温的空间差异

图 6 为沙丘不同地貌部位各深度层地温在 4 个观测日的均值, 各部位由地表向下地温均呈波动升高趋势, 且地表下 40 cm 深度内的地温在冻结期基本稳定在 0 °C 以下, 40 cm 深度以下的地温多在 0 °C 以上的原因部分观测日地温为正值, 导致均值在 0 °C 以上。

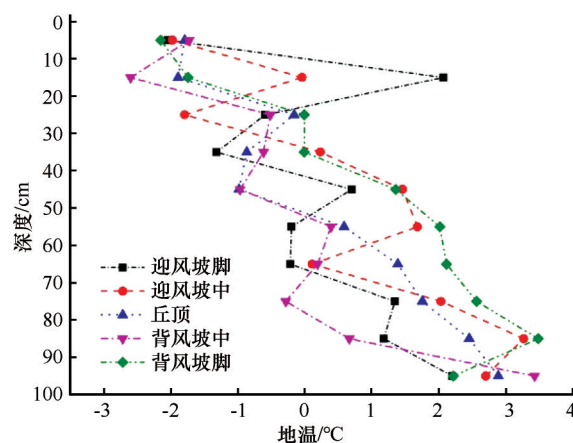


图 6 流动沙丘各地貌部位地温的垂向差异

Fig. 6 Ground temperature profiles of various geomorphic sites on a mobile dune

图 7、图 8 分别为灵武白芨滩流动沙丘各部位冻结层在 2018/2019 年冻结期内硬度、含水率测量值的均值。迎风坡脚至背风坡脚, 各部位的冻结层硬度整体呈递增趋势, 迎风坡中的冻土硬度最小 (图 7 中的堆积柱状图); 1 m 深度内迎风坡 (坡脚、坡中) 冻土硬度垂向上差异较小, 丘顶冻土硬度由地表向下呈缓慢递增趋势, 背风坡脚的呈快速递减趋势, 背风坡中的则呈先减后增趋势; 背风坡 (坡中和坡脚) 地表下 30 cm 厚度的冻结层为整个沙丘冻土硬度最大的区域 (图 7 柱状图)。如图 8 所示, 流动沙丘各部位冻结层的含水率整体在 1.66% 以上, 含水率最大值为 4.19%; 各部位地表未冻层的含水率相比冻结层的整体偏小, 其中丘顶地表未冻层的含水率在 1% 左右; 迎风坡脚冻结层的平均含水率最大 (3.46%), 其他 4 个部位的平均含水率在 2.6% ~ 2.8% 之间。

4 讨论

4.1 沙丘冻结层硬度与地温及含水率的关系

地表冻结通过影响可蚀量从而控制风沙活动的强度, 以往在蒙古高原和沙丘的研究均发现冻结

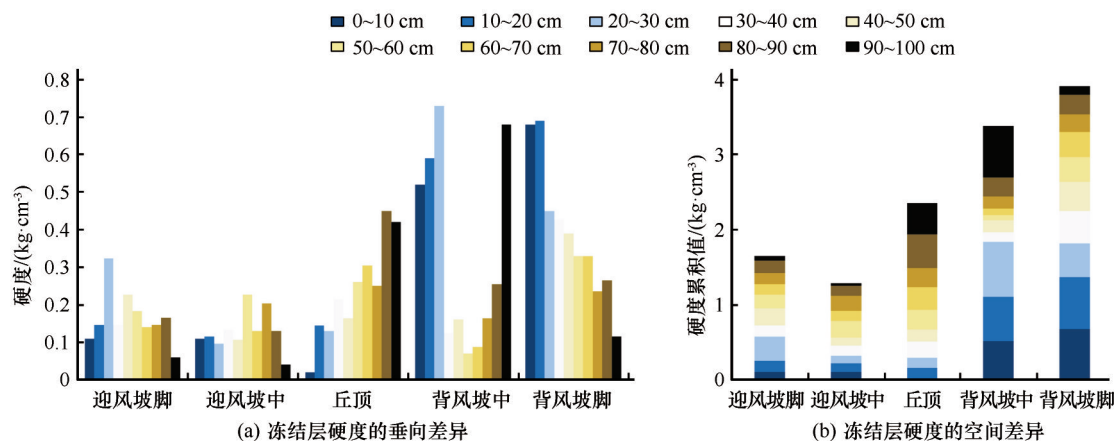


图7 流动沙丘各地貌部位冻结层硬度差异

Fig. 7 Spatial differences of frozen layer hardness (a) and cumulative hardness (b) of various geomorphic sites on a mobile dune changing with depth

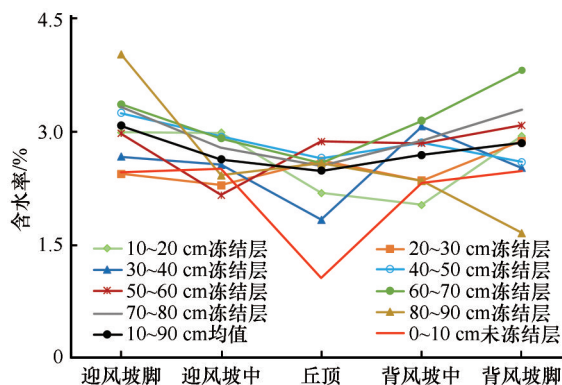


图8 流动沙丘未冻层和冻结层含水率的空间差异

Fig. 8 Moisture contents at various depths within frozen layers and unfrozen layer of a mobile dune

地表的起沙风速明显大于解冻地表^[11-13], 故在此讨论冻结及冻结层硬度的影响因素。

本研究的室内控制实验结果如图9所示, 如含水率低于1.6%, 温度即使降至-35℃沙土也无法冻结, 即含水率大于1.6%是宁夏河东沙地沙丘冻结的必要条件, 这一结论验证了本文野外观测结果

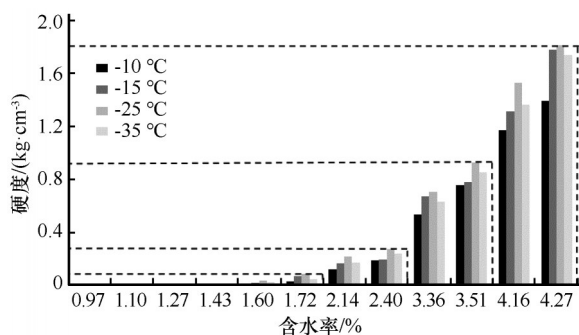


图9 不同含水率和温度条件下沙丘沙冻结层的硬度

Fig. 9 Hardness of frozen layers of dune sand under different moisture content and temperature

(图8)中冻结层含水率均大于1.66%, 而未冻结层含水率为1%的现象。Wang等^[15]在神木县的研究发现, 该地的土壤(沙壤土)冻结临界含水率为2.34%, 远大于1.66%, 原因可能是土壤机械组成差异所致, 研究区的沙丘沙以细沙为主, 中沙和极细沙为辅, 基本不含粉沙和黏土(表1), 而神木县的沙壤土中含34%的粉沙和黏土。

图10中含水率每上升约1%, 硬度也随之增加一个梯度, 温度一定时冻土层硬度与含水率间存在极显著的幂函数关系, 而水分一定时随着温度的降低冻结层硬度缓慢上升(图9)。-35℃时的冻土硬度小于同一水分条件下-25℃时的冻土硬度, 原因为多次测量导致水分流失且测量仪器致冻土破碎所致。综上所述, 本研究认为温度和水分为共同控制沙丘沙是否冻结的因素, 但当温度满足冻结条件后, 水分是控制冻土硬度增减幅度的主要因子。

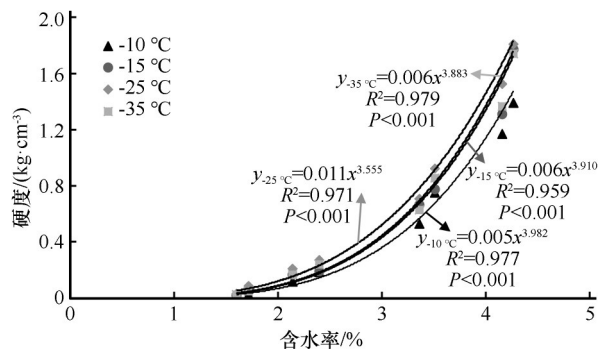


图10 沙丘沙冻结层硬度与含水率的关系

Fig. 10 The relationship between hardness and moisture content of frozen layers of dune sand

4.2 沙丘地表干沙层的阈值及作用

本研究发现在冻结期最冷阶段, 固定沙丘的各地貌部位地表干沙层厚度均为 10 cm, 流动沙丘的迎风坡中和丘顶为 0 cm, 其他部位干沙层厚度的也均为 10 cm(图 5)。迎风坡是风蚀最强的区域^[20], 丘顶通常也是侵蚀区, 由此推断流动沙丘迎风坡和丘顶干沙层厚度为 0 cm 的原因是测量前发生风蚀所致。固定沙丘和流动沙丘背风侧的干沙层厚度完全一致, 故判断宁夏河东沙地冻结期内沙丘表层未冻结的最大深度约为 10 cm。

因流动沙丘地表遭受风蚀, 以沙障固定的沙丘为例分析地表干沙层存在的原因。本研究对固定沙丘表层的观测结果如表 3 所示, 固定沙丘各地貌部位地表 10 cm 深度沙层的含水率在 0.38% ~ 1.29% 之间; 而地温除迎风坡脚外其他部位均在 0℃ 以下, 由此判断沙丘表层未发生冻结的原因是含水率低于冻结所需含水率的阈值(1.6%)。在青藏高原和室内实验研究中均发现沙层对冻结层具有保护作用, 沙层导热性能差, 反射率高, 其覆盖下的冻结层温度和变幅低于表面裸露的冻结层^[21-25]。日间沙丘获得的热量被干沙层截留, 难以到达冻结层, 因此干沙层在很大程度上起到保护冻结层的作用, 同时干沙层能抑制水分蒸发, 具有保水作用^[26], 避免冻结层因失水而融化。

表3 沙障固定沙丘表层 10 cm 深度内的含水率和 5 cm 深度处的地温

Table 3 Ground temperature at 5 cm depth and moisture content within 0 - 10 cm depth in fixed dune by barriers

项目	西南侧迎风坡脚	迎风坡中	丘顶	东北侧背风坡脚
地温/℃	1	-2	-4	-3
含水率/%	0.38	0.46	0.55	1.29

4.3 流动沙丘与固定沙丘迎风坡冻结层厚度差异的成因

沙丘表面风蚀强度不一, 迎风坡是风蚀最强的区域, 当沙面 10 cm 厚的干沙层被吹蚀后, 冻结层暴露。因不断有强弱风吹, 造成冻结层中的孔隙冰升华^[27-28], 冻结层的水分不断减少, 同时沙丘沙比热容较小, 在晴天受光照后地表温度快速升高, 两者共同作用下冻结层逐渐融化, 融化的表层沙又不断被风蚀, 最终沙丘冻结层表面呈现融化-风蚀交替作用的循环过程^[9], 并造成冻结层厚度逐渐减小。沙障固定沙丘表面的干沙层较为稳定, 冻结层

始终不会暴露, 不会出现融化-风蚀的循环过程, 因此流动沙丘迎风坡的冻结层厚度小于固定沙丘迎风坡的。戴黎聪等^[29]在青海海北站的研究表明, 季节冻土多表现出单向冻结双向融化的特征, 但基于本研究中流动沙丘在融化-风蚀的不断循环后, 在融化期前始终有冻结层的现象, 推断流动沙丘迎风坡冻结层可能具有表层融化底部冻结的特征, 冻结和融化同步进行或昼融夜冻。

4.4 流动沙丘各部位冻结时长及冻结厚度差异的影响因素

本研究发现背风坡的冻结时长和冻结厚度最大, 迎风坡次之, 丘顶最小, 且丘顶冻结厚度受到短时气温影响, 而背风坡冻结厚度受较长历时气温影响, 迎风坡冻结层厚度与气温无显著的相关性。郭慧等^[30]在甘肃河西地区、张威等^[31]在辽宁朝阳地区的研究也发现季节冻土深度与冬季最低气温密切相关, 李玲萍等^[32]在石羊河流域的研究表明, 影响冬季最大冻土深度的气象因子是气温和极端最低地温, 本研究中背风坡和丘顶冻结深度受气温影响的结果与以上的研究结果相同。塔克拉玛干沙漠沙丘 4 月底白天丘顶和迎风坡的地表温度高于背风坡, 夜间则低于背风坡, 因此丘顶和迎风坡的地表温度日较差(可达 40℃)远大于背风坡, 约为背风坡的 2 ~ 3 倍^[33]。由此推测因气温与表层地温间有密切的关系^[11,34], 丘顶地温日较差极大, 其冻结层快速响应地温的变化, 则丘顶冻结层厚度表现出受短时气温影响; 而背风坡因地温日较差小, 对冻结层的影响较小, 因此主要受长历时气温的控制。同时, 地温又是影响冻融两个状态下导热系数差异的因子之一^[35], 丘顶和背风坡地温差异对导热系数的作用可能也是造成丘顶和背风坡冻结层分别受短时和长历时气温影响的因素之一。迎风坡面冻结层厚度与短时和长历时气温间均无相关性的原因是迎风坡冻结层表面不断受风蚀所致。

5 结论

通过野外定期观测与室内控制实验相结合, 分析和探讨了宁夏河东沙地沙丘冻融过程的时空差异及其发生机理。沙丘各坡位的冻结起始日期和结束日期有所差异, 冻结时长由大到小依次为: 背风坡脚>背风坡中>迎风坡中>迎风坡脚>丘顶。不同坡位间的冻结层物理特性(硬度、温度、水分)也存在差异。沙丘冻融过程及冻结层物理性状与沙

丘坡位、气温、土壤水分等因素密切相关,当温度满足冻结条件后,水分是控制冻土硬度的主要因子。野外观测和室内控制实验均证明,宁夏河东沙地沙丘冻结的必要条件是含水率不低于1.6%,且冻结层硬度与含水率呈幂函数关系($P < 0.001$),随温度降低(一定降幅内)呈缓慢递增趋势。

沙丘冻结时长、冻结层硬度以及冻结层深度是影响沙丘在季节冻结期内风蚀和形态变化的重要因素。本研究发现在季节冻结期内沙丘表面始终存在干沙层,在最冷的时段其最大厚度约为10 cm,且流动沙丘迎风坡存在干沙层遭受风蚀致冻结层出露,融化后再风蚀的循环过程,以上结论表明这一循环过程使冻结对风蚀作用程度的相关研究更为复杂。

过去风沙地貌学多研究低纬度地区不发生冻结的风蚀风积过程,对冻土区风沙地貌的研究则多关注积雪对风沙地貌特征的重塑,很少以发生季节冻融的风沙地貌为研究对象。本研究从流动沙丘入手,着重研究沙丘冻融过程,但对其作用机理关注较少,在后续研究中还需对现有的研究结果加以升华,延长研究的时间序列,扩大研究范围,加深对冻融过程与沙丘形态变化关系的机理研究,为季节冻土区风沙地貌的进一步研究提供方法上的探索 and 理论上的支持。

参考文献(References):

- [1] Qin Dahe. Glossary of cryospheric science[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016. [秦大河. 冰冻圈科学词典[M]. 北京: 气象出版社, 2016.]
- [2] Zhang Feiyun, Guo Lingpeng, Hao Jiansheng, et al. Analyses on the characteristics of seasonally frozen ground under snow cover and forest/grassland in Kunes Valley, western Tianshan, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(2): 316 – 323. [张飞云, 郭玲鹏, 郝建盛, 等. 新疆天山西部巩乃斯河谷积雪与森林/草地覆盖条件下季节冻土特征分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 316 – 323.]
- [3] Hao Jiansheng, Zhang Feiyun, Huang Farong, et al. Altitudinal distribution pattern of seasonally frozen ground and its influencing factors in Ili[J/OL]. Journal of Glaciology and Geocryology [2020-08-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.p.20190227.1545.002.html>. [郝建盛, 张飞云, 黄法融, 等. 新疆伊犁地区季节冻土沿海拔的分布规律及其影响因素[J/OL]. 冰川冻土[2020-08-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.p.20190227.1545.002.html>.]
- [4] Wang Chenghai, Dong Wenjie, Wei Zhigang. The feature of seasonal frozen soil in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 56(5): 523 – 531. [王澄海, 董文杰, 韦志刚. 青藏高原季节冻土年际变化的异常特征[J]. 地理学报, 2011, 56(5): 523 – 531.]
- [5] Chen Bo, Li Jianping. Characteristics of spatial and temporal variation of seasonal and short-term frozen soil in China in recent 50 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(3): 432 – 443. [陈博, 李建平. 近50年来中国季节冻土与短时冻土的时空变化特征[J]. 大气科学, 2008, 32(3): 432 – 443.]
- [6] Ren Jingquan, Liu Yuxi, Wang Dongni, et al. The change of frost depth of seasonally frozen soil and its response to climate change in Jilin Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1098 – 1106. [任景全, 刘玉汐, 王冬妮, 等. 吉林省季节冻土冻结深度变化及对气候的响应[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1098 – 1106.]
- [7] Wang Xiqiang, Chen Rensheng, Liu Guohua, et al. Spatial distributions and temporal variations of the near-surface soil freeze state across China under climate change[J]. Global and Planetary Change, 2019, 172: 150 – 158.
- [8] Musa A, Liu Ya, Wang Anzhi, et al. Characteristics of soil freeze-thaw cycles and their effects on water enrichment in the rhizosphere[J]. Geoderma, 2016, 264(11): 132 – 139.
- [9] Ning Kai, Wang Nai'ang, Hu Wenfeng, et al. Characteristics of the seasonal frozen ground in Badain Jaran Desert[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1209 – 1216. [宁凯, 王乃昂, 胡文峰, 等. 巴丹吉林沙漠季节冻土特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1209 – 1216.]
- [10] Wang Xueqin, Zhang Yuanming, Jiang Jin, et al. Variation pattern of soil water content in longitudinal dune in the southern part of Gurbantünggüt Desert: how snow melt and frozen soil change affect the soil moisture[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2): 262 – 268. [王雪芹, 张元明, 蒋进, 等. 古尔班通古特沙漠南部沙垄水分动态: 兼论积雪融化和冻土变化对沙丘水分分异作用[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 262 – 268.]
- [11] Wu Yiheng, Zhao Pengwu, Zhou Mei, et al. Freeze-thaw process of seasonal frozen soil and its responses to moisture and temperature[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1568 – 1575. [乌艺恒, 赵鹏武, 周梅, 等. 季节性冻土区土体冻融过程及其对水热因子的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1568 – 1575.]
- [12] Xie Shengbo, Qu Jianjun. Effect of sand sediments accumulated in sand-control projects on the thermal regime of underlying permafrost and its mechanism[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(12): 77 – 82. [谢胜波, 屈建军. 青藏铁路工程防沙产生的积沙对下伏冻土的热影响及机理[J]. 铁道学报, 2013, 35(12): 77 – 82.]
- [13] Thomas E B, Hugenholtz C H. Winter variability of aeolian sediment transport threshold on a cold-climate dune[J]. Geomorphology, 2012, 177/178: 38 – 50.
- [14] Han Lijian, Tsunekawa A, Tsub M. Effect of frozen ground on dust outbreaks in spring on the eastern Mongolian Plateau[J]. Geomorphology, 2011, 129(3/4): 412 – 416.
- [15] Wang L, Shi Z H, Wu G L, et al. Freeze/thaw and soil moisture effects on wind erosion[J]. Geomorphology, 2014, 207: 141 – 148.
- [16] Wang Dayan, Ma Wei, Niu Yonghong, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(1): 34 – 43.
- [17] Aoyama K, Ogawa S, Fukuda M. Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 1985: 217 – 222.
- [18] Liu Tiejun, Xu Xiangtian, Yang Jie. Experimental study on

- the effect of freezing-thawing cycles on wind erosion of black soil in Northeast China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 136: 1–8.
- [19] Zhan Xiuli, Han Lei, Lai Rongsheng. Seasonal variation and spatial distribution characteristics of soil water content in shallow aeolian sandy soil in east of Yellow River in Ningxia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(10): 138–144. [展秀丽, 韩磊, 赖荣生. 宁夏河东沙区浅层风沙土土壤含水量季节变化及空间分布特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(10): 138–144.]
- [20] Ma Yuming, Yao Honglin. Observation of wind erosion status of sand dunes in Mu Us sandy land by French photoelectron collectors[J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(Suppl 1): 70–73. [马玉明, 姚洪林. 光电子集沙仪对毛乌素沙地沙丘蚀积过程的观测[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(增刊1): 70–73.]
- [21] Wang Shaoling, Zhao Lin, Li Shuxun. Interaction between permafrost and desertification on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(1): 33–39. [王绍令, 赵林, 李述训. 青藏高原沙漠化与冻土相互作用的研究[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(1): 33–39.]
- [22] Cai Diwen, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Coupled hydro-thermal model of underlying permafrost influenced by sand accumulation[J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(3): 523–532. [蔡迪文, 张克存, 安志山, 等. 积沙影响下伏冻土的水热耦合模型研究[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(3): 523–532.]
- [23] Xie Shengbo, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. New discoveries on the effects of desertification on the ground temperature of permafrost and its significance to the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geography*, 2012, 57(8): 838–842.
- [24] Xie Shengbo, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Effect of sandy sediments produced by the mechanical control of sand deposition on the thermal regime of underlying permafrost along the Qinghai-Tibet Railway[J]. *Land Degradation and Development*, 2013, 24(5): 453–462.
- [25] He Zhilin, Zu Ruiping, Zhang Kecun, et al. Laboratory experiment of the influence of aeolian sand accumulation on permafrost temperature[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 156–161. [贺志霖, 俎瑞平, 张克存, 等. 风沙堆积对多年冻土温度影响的室内试验研究[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 156–161.]
- [26] Liu Xiping, Zhang Tonghui, Zhao Halin, et al. Influence of dry sand bed thickness on soil moisture evaporation in mobile dune[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(4): 523–526. [刘新平, 张铜会, 赵哈林, 等. 流动沙丘干沙层厚度对土壤水分蒸发的影响[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(4): 523–526.]
- [27] Dijk D V, Law J. Sublimation and aeolian sand movement from a frozen surface: experimental results from Presqu'ile Beach, Ontario[J]. *Geomorphology*, 1995, 11(3): 177–187.
- [28] Dijk D V, Law J. The rate of grain release by pore-ice sublimation in cold-aeolian environments[J]. *Geografiska Annaler: Series A Physical Geography*, 2003, 85(1): 99–113.
- [29] Dai Licong, Ke Xun, Zhang Fawei, et al. Characteristics of hydro-thermal coupling during soil freezing-thawing process in seasonally frozen soil regions on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2): 390–398. [戴黎聪, 柯浔, 张法伟, 等. 青藏高原季节冻土区土壤冻融过程水热耦合特征[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2): 390–398.]
- [30] Guo Hui, Li Dongliang, Zhang Qiang, et al. Interdecadal variability of seasonal frozen ground depth and its climatic reasons in Hexi Corridor of Gansu[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(4): 503–508. [郭慧, 李栋梁, 张强, 等. 甘肃河西季节冻结深度年代际变化特征及其气候成因分析[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(4): 503–508.]
- [31] Zhang Wei, Ji Ran. Response of maximum seasonally frozen depth and duration of soil frozen to climate change in Chaoyang Prefecture of Liaoning Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 18–25. [张威, 纪然. 辽宁朝阳地区季节冻土最大冻土深度和持续冻结时间与气候变化的响应研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 18–25.]
- [32] Li Lingping, Chen Ying, Li Wenli, et al. Influence of winter maximum frozen soil depth on sand-dust weather days over Shiyang River basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(5): 1204–1209. [李玲萍, 陈英, 李文莉, 等. 石羊河流域冬季冻土对沙尘天气的影响分析[J]. *土壤通报*, 2013, 44(5): 1204–1209.]
- [33] Jin Lili, He Qing, Li Zhenjie, et al. Temperature features of sand dune in hinter land of Taklimakan Desert[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2010, 28(2): 134–141. [金莉莉, 何清, 李振杰, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙丘温度特征浅析[J]. *干旱气象*, 2010, 28(2): 134–141.]
- [34] Chou Yaling, Li Yong'e, Wang Lijie, et al. Effects of seasonal freezing and thawing on the hydrothermal changes of shallow soil in the western Weihe River basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 926–936. [丑亚玲, 李永娥, 王莉杰, 等. 渭河流域西部季节冻融对浅层非饱和土壤水热变化的影响[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4): 926–936.]
- [35] He Ruixia, Jin Huijun, Zhao Shuping, et al. Review of status and progress of the study in thermal conductivity of frozen soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 116–126. [何瑞霞, 金会军, 赵淑萍, 等. 冻土导热系数研究现状及进展[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 116–126.]

Spatial and temporal differences of freeze-thaw processes on dunes in the East Desert of the Yellow River in Ningxia

QIN Haiqin^{1,2}, ZHANG Ping¹, ZHAN Xiuli², HUO Zhanhua¹, MA Juanli¹,
WU Hongyue¹, JIN Lei¹

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Resources and Environment,
Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The deserts and sandy lands in China totally or partly located in seasonally frozen soil regions. The aim of this study on freeze-thaw processes of dunes was to further elucidate wind erosion and morphological evolution of dunes during seasonal freezing. The freeze-thaw processes and its controlling factors of mobile dunes and fixed dunes by barrier located in the East Desert of the Yellow River in Ningxia were analyzed through field observation and laboratory experiment. The results show: The freezing period of dunes was from mid-November to early March next year, there were distinct differences in freezing duration and thickness of frozen layers among geomorphic sites of mobile dunes (leeward slope > windward slope > top of dune). During the seasonal freezing period, there was a surface unfrozen layer on dune which protected the frozen layer, and the thickness of it was about 10 cm. The frozen layer thickness of mobile dune was much smaller than that of fixed sand dune by barriers, which caused by the cyclic process of thawing and wind erosion on frozen layer surface in the windward slope of mobile dune. The thickness of frozen layer of dune top and leeward slope on mobile dune affected by short-term (32 h) and long-term (15 d) average temperature, respectively. The results from field observation and laboratory experiment indicated that the dune could not be frozen with sand moisture content under 1.6%; there was a power function relation between the hardness of frozen soil and moisture content ($P < 0.001$), and the hardness increased slowly with temperature decreasing.

Key words: seasonally frozen soil; freezing period; dune freezing; East Desert of the Yellow River in Ningxia

(责任编辑: 周成林; 编辑: 武俊杰)