

# 砒砂岩与沙复配土壤的冻融特征

王晶<sup>1,2,3</sup>, 韩霁昌<sup>1,2</sup>, 张扬<sup>1,2</sup>, 王欢元<sup>1,2</sup>

(1. 陕西省土地工程建设集团, 陕西 西安 710075;

2. 陕西地建土地工程技术研究院, 陕西 西安 710075; 3. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

**摘要:** [目的] 揭示砒砂岩与沙复配土壤冻融特征及其对风蚀的影响, 为毛乌素沙地土地整治可持续性提供理论依据。[方法] 利用陕西省榆林市榆阳区气象资料和土壤观测数据, 结合含水量变化规律, 以砒砂岩与沙复配土壤为研究对象, 沙土为对照, 探究 2 种土壤冻结层形成差异、冻融过程及积雪消融特点。[结果] 由于含水量的差异, 复配土壤与沙冻结层形成特点具有差异, 沙地表层通常会形成土壤干层, 从表层之下冻结, 而复配土壤的冻结层在地表形成; 复配土壤的最大冻结深度为 116.0 cm; 大于沙地的最大冻结深度 96.0 cm, 且冻结层融解时间晚于沙地一周; 积雪覆盖条件下, 沙地表层存在 1.0~6.4 cm 的土壤干层, 而复配土壤表层不存在干层, 复配土壤积雪盖度和厚度均大于原始沙地, 阳坡尤为显著。[结论] 土壤冻层和积雪在复配土壤地表形成了 2 层保护层, 减少了休闲期的风蚀作用。

**关键词:** 复配土壤; 沙; 冻结层; 含水量; 积雪消融; 风蚀

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)05-0051-05

**中图分类号:** S152.4<sup>+</sup>1

**文献参数:** 王晶, 韩霁昌, 张扬, 等. 砒砂岩与沙复配土壤的冻融特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 051-055. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.016

## Freezing and Thawing Characteristics of Mixed Soil with Soft Rock and Sand

WANG Jing<sup>1,2,3</sup>, HAN Jichang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yang<sup>1,2</sup>, WANG Huanyuan<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Land Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China;

2. Shaanxi Land Construction Group Land Engineering Technology Research Institute, Xi'an,

Shaanxi 710075, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of the study is to reveal the freezing and thawing characteristics of the mixed soil and its effect on wind erosion and to provide a theoretical basis for the sustainability of the Mu Us sandland reclamation. [Methods] Taking mixed soil with soft rock and sand as the research object and sand as a control, the paper explored the differences in the freezing-layer formation, freezing-thawing processes and the snowpack melting of the two types of soil using meteorological data and soil and water content data of Yuyang District of Yulin City, Shaanxi Province. [Results] Due to the differences in water content, difference exists in the formations of the freezing layers between the two soils. Sandy soil was usually formed in dry layer and frozen under the surface while the mixed soil is frozen at the surface. The maximum frozen depth of mixed soil was 116.0 cm, deeper than that of the sand(96.0 cm), and the freezing thawing time was a week later than the sand. When covered with snow, the surface of sand has 1.0 to 6.4 cm dry layer while the surface of mixed soil did not has. The snow coverage and thickness of mixed soil were greater than the sand, especially on the sunny slope. [Conclusion] Frozen soil layer and the snow could form two protective layers on the surface of mixed soil, and therefore reduce the wind erosion during the fallow period.

**Keywords:** mixed soil; sand; freezing layer; water content; snowfall and snowmelt; wind erosion

收稿日期: 2015-11-06

修回日期: 2016-01-29

资助项目: 国土资源部公益性行业科研专项“毛乌素沙地土地综合整治技术研究及示范应用”(201411008)

第一作者: 王晶(1987—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士研究生, 工程师, 主要从事土地工程及土壤侵蚀研究。E-mail: wangjing0722@126.com。

通讯作者: 韩霁昌(1966—), 男(汉族), 陕西省渭南市人, 博士, 高级工程师, 主要从事土地工程研究。E-mail: hanjc\_sxdj@126.com。

砒砂岩是一种松散结构的岩层。具有岩层厚度小、压力低、成岩程度低、沙粒间胶结程度及结构强度差,易受侵蚀等特点。主要分布在晋陕蒙接壤区,从西北向东南,沿毛乌素沙地东北缘地带延伸,总面积约  $1.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是毛乌素沙地一种重要的伴生岩<sup>[1]</sup>。

毛乌素沙地是中国农牧交错区的典型代表,土地沙化是困扰土地利用的最大危害。在毛乌素沙地利用砒砂岩与沙复配成土研究已经取得了成功,为毛乌素沙地大规模土地整治提供了可行的方法<sup>[2]</sup>。但每年 11 月到次年 5 月,是毛乌素沙地的旱季,同时也是毛乌素沙地作物的非生长季节和盛行风季,地表植被覆盖减少,可能会增加风力侵蚀对生态环境的破坏。研究表明:砒砂岩与沙复配土壤能有效改善土壤结构、增加土壤导水性、透气性<sup>[1-4]</sup>,但目前研究多集中在室内试验及生长期复配土壤对作物生长的促进作用,在休闲期复配土壤的稳定性和可持续性研究较少。因此,本文拟以砒砂岩与沙复配土壤为研究对象,以沙土作为对照,利用榆阳区气象资料和土壤观测数据,结合含水量变化规律,探究 2 种土壤冻结层形成差异,冻融过程及积雪消融特点,旨在揭示砒砂岩与沙复配土壤冻融特征及其对风蚀的影响,为这一地区土地整治实施的可持续性提供理论依据。

## 1 研究内容和方法

### 1.1 研究区概况

榆阳区位于陕西省榆林市中部,西北与内蒙古自治区乌审旗接壤,西南与横山县毗邻,东北与神木相连,东南与佳县地接,南与米脂县互邻,位于  $37^{\circ}49' - 38^{\circ}58' \text{ N}$ ,  $108^{\circ}58' - 110^{\circ}24' \text{ E}$ ,总面积  $7\,053 \text{ km}^2$ 。地处毛乌素沙地南缘,属于典型的半干旱温带大陆性气候,年平均降水量  $365.7 \text{ mm}$ ,年平均气温  $8.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,无霜期  $150 \text{ d}$  左右;年均大风日数  $10 \sim 40 \text{ d}$ ,最长达  $95 \text{ d}$ ,每年盛行风季为 10 月到次年的 5 月;是典型的农牧交错生态脆弱区,区域内广泛分布着砒砂岩和沙,水土流失和土地沙化严重。

### 1.2 研究方法

1.2.1 土壤含水量变化 在一个  $70 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)的通透容器中,模拟沙和砒砂岩与沙复配土壤水分的运移过程。将其中一个容器底部  $20 \text{ cm}$  填入沙子,表层  $30 \text{ cm}$  填入砒砂岩与沙(直径在  $2 \sim 3 \text{ cm}$  之间)比例为  $1:2$  的混合样品,砒砂岩与沙进行充分混合;同时,另一个容器用沙作为对照,全部填入沙子,容器下部与地面相接。向两个容器中同时灌水,充分饱和,直至下部有水渗出。分别于灌

水后  $6, 18, 30, 42, 54, 102, 294, 318, 342, 390, 438, 510, 606, 678, 798, 894, 990, 1\,110 \text{ h}$ ,按照  $0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30 \text{ cm}$  分层采样,将样品充分混合,测定  $0-30 \text{ cm}$  复配土壤和沙随时间的平均含水量变化。土壤水分为质量含水量,采用烘干法测定。

1.2.2 土壤冻融深度测定 在研究区设置 2 个  $15 \text{ m} \times 12 \text{ m}$  的小区,其中一个为砒砂岩与沙复配土壤小区,在表层  $30 \text{ cm}$  覆盖了  $1:2$  混合比例的复配土壤(砒砂岩尽量粉碎,直径在  $4 \text{ cm}$  以下,保证表层砒砂岩与沙按比例均匀混合覆盖), $30 \text{ cm}$  以下为当地沙土;另一个为原始沙地对照小区。试种作物为玉米(榆单 9 号)和马铃薯(夏波蒂)。2 个小区均采用相同的灌溉与施肥处理。定期监测基本气象要素(最高温度、最低温度、平均温度、降雨量、太阳辐射、相对湿度、日照时数、风速等)。采用冻深管法测定土壤冻融深度,试验小区 2012 年 4 月建成,观测期从 2012 年 11 月至 2013 年 3 月。

1.2.3 积雪消融调查 2011 年 11 月 26 日,榆林市榆阳区降雪,积雪厚度  $12 \text{ cm}$ 。分别在降雪后  $14 \text{ d}$  和  $40 \text{ d}$  进行了 2 次积雪消融情况调查。选择坡度、坡向、海拔等地形条件均相似的覆盖复配土壤土地和原始沙地,阳坡、阴坡及平地各选择一块,观测积雪消融情况和积雪覆盖下垫面状况。调查时在选定区域用梅花法选取 5 个点测量,取平均值。整治后土地坡度很小,为了坡度、坡向近似,便于比较,选取机械翻耕后的微地形进行调查。

1.2.4 数据分析 相关计算在 Excel 中完成,在 SPSS 17.0 软件中采用独立样本 T 检验进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

冻融是中高纬度和高海拔地区一个重要的气候现象,冻结层的形成会对土壤的结构、团聚体等理化性质产生重大的影响<sup>[5-6]</sup>。一方面,在冰的作用下,沙子胶结成一层保护壳,以此隔开气流与松散沙面的直接接触,从而起到了防治风蚀的作用;另一方面,冻融促进了土壤团聚体的形成<sup>[7-8]</sup>,土中水的冻结可以产生土的粘聚力,使冻土具有抗拉强度、无侧限抗压强度和抗剪强度,增强了土壤的抗蚀性能。

### 2.1 砒砂岩与沙复配土壤与沙冻结层形成的差异

冻土中的含水量是影响冻结和融化过程的一个非常重要的指标。冻结条件下,土壤含水量是土壤水分相变的物质基础,其多寡决定着土壤的冻结类型(多孔状或密实状)、冻结过程及土壤含冰量<sup>[9]</sup>。含水

量也是决定季节冻结和融化深度的主要因素<sup>[10]</sup>。同时,在冻结过程中,土壤温度和含水量互相作用,互相影响,土壤的含水量状况能够影响土壤温度变化的幅度和趋势<sup>[11]</sup>。

2.1.1 复配土壤与沙的含水量变化 通过把砒砂岩与沙复配土壤和沙饱和后,观察 1 110 h 土壤含水量随时间的变化。经过 1 110 h 的观测,砒砂岩与沙的复配土壤及沙的变化趋势如图 1 所示。沙、砒砂岩与沙复配土壤含水量随时间变化的趋势相同,均随着时间延长含水量下降。砒砂岩与沙的复配土壤含水量变化分为 2 个阶段:在最初的 102 h 内,含水量保持在 14.76% 到 15.87% 之间波动;102 h 后,含水量逐渐缓慢降低,最终下降到 1 110 h 的最低含水量 2.59%;沙的含水量的变化分为 3 个阶段:第一阶段,在最初的 42 h 内,沙的含水量快速降低,从 15.90% 降低到 3.60%,土壤水分损失率达到 77.4%;第二阶段,42 h 到 294 h,含水量缓慢下降,从 3.60% 降低到 1.39%。第三阶段,294 h 后,含水量达到最低,稳定于 1.0% 以下。沙的保水性能差,土壤水分损失速度快,砒砂岩具有显著的保水特性<sup>[4]</sup>,砒砂岩与沙复配后,含水量下降的速度较慢,土壤水分保持稳定。

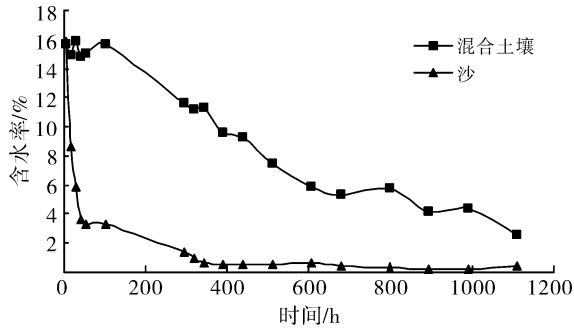


图 1 复配土壤与沙含水量随时间变化

2.1.2 复配土壤与沙冻结层形成特点的差异 研究表明,含水量越低,冻结温度越低,如果土壤含水量低于冻结临界含水量时(1%),则不会冻结<sup>[12]</sup>。从秋季开始,毛乌素沙地进入旱季,降雨少,因此沙地从秋季开始处于弱失水阶段,表层的含水量很小,因此地表不容易形成冻结层。而在地表以下一段距离内,随着土壤水分的渐渐增大,当温度和含水量同时满足冻结要求时,冻结层才开始形成,并向下发展。因此,沙地土壤表层通常会形成干沙层,成为毛乌素沙地冬季耕地的主要风力侵蚀源。

砒砂岩与沙混合后,土壤的保水性较沙大幅度提高。由于复配土表层含水量比沙地的含水量高,因此复配土的土壤表层更容易冻结。砒砂岩与沙复配土壤的冻结层在地表形成,冻结锋面由上层土壤持续向下层发展,并且随着土壤含水量越高,冻结深度也越大。砒砂岩与沙复配表层冻结层的形成,使冬季砒砂岩与沙复配冻结土壤的防风蚀能力显著增强。

2.2 砒砂岩与沙复配土壤和沙的冻融过程

季节性冻土分布区,冬春期间土壤经历冻结和融化两大物理过程。在环境温度降低过程中,表层土壤通过地面放热使自身温度降低,当温度降低到冻结点时,土壤内水分开始冻结,形成冻土。春季温度升高,土层由地表向下和冻结深度向上双向融化。土体解冻的过程就是土体冻结的逆过程。土壤冻结和融化深度不仅依赖于当地的气候条件,同时还受到土壤质地、含水量以及地形和环境特征的影响<sup>[13]</sup>。由图 2 可以看出,复配土壤和沙的冻土深度变化规律相似,基本随着气温的降低,冻土深度增加,但最深冻土深度比温度表现出一定的滞后性。整个冬季最低温度在 12 月 30 日左右,而最深冻土深度出现在 2013 年 1 月 23 日左右。将冻融过程分为 3 个阶段。

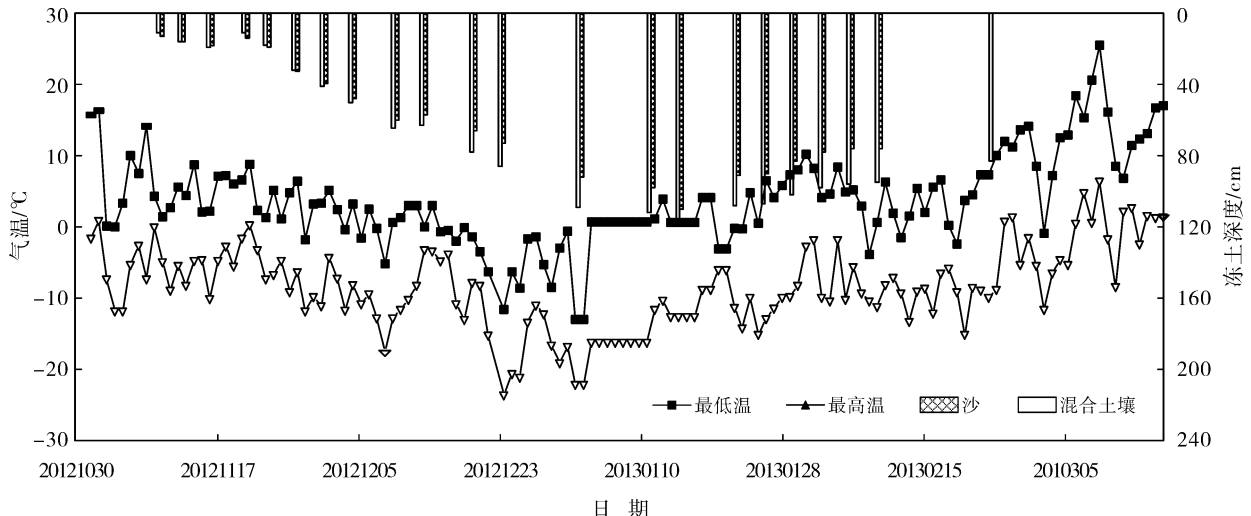


图 2 复配土壤与沙冻融过程

2.2.1 不稳定冻结阶段 随着冬季的到来,白天的温度处于正温,气温高于地温,土体处于热吸收状态;而夜晚的温度处于负温,气温低于地温,土体处于热损耗状态。当土体白昼吸收的热量不足以抵偿夜间损耗的热量时,土壤中的孔隙水就开始冻结。地表土壤因昼夜温度在  $0^{\circ}\text{C}$  波动,开始出现昼融夜冻现象,称此阶段为不稳定冻结阶段。复配土壤于 11 月 3 日左右开始出现不稳定冻结,而沙地出现不稳定冻结时间与之相近。

2.2.2 稳定冻结阶段 自 2012 年 11 月 22 日,气温骤降,当地大部分时间低于  $0^{\circ}\text{C}$  而长期处于负温,冻土层不再完全融化,稳定冻结层出现。在驱动力的驱使下,土壤的冻结锋面由上层土壤持续向下层稳定发展,土层从地表向下开始冻结,进入稳定冻结阶段,冻层厚度稳定增加。该阶段复配土壤最大冻结速率达  $1.4\text{ cm/d}$ ,在 1 月 23 日左右达到最大冻结深度,为  $116.0\text{ cm}$ ;沙地最大冻结深度略浅,为  $98.0\text{ cm}$ 。

2.2.3 消融解冻阶段 自 2013 年 1 月 31 日,太阳辐射开始增强,气温回升,土壤进入消融解冻阶段,土层由地表向下和冻结深度向上双向融化;由图 2 可以看出,沙地冻结层的融解时间大概为 30 d,在 3 月 4 日全剖面融解;复配土壤进入消融解冻阶段出现时间与沙地大致相同,但冻结层的融解时间却持续到 3 月 12 日,比沙地要晚 1 周左右。

### 2.3 降雪后地面土壤干层与积雪覆盖变化

积雪覆盖可以有效减少大风对裸露地表的侵蚀,同时,积雪融化后,融水可为春季作物生长提供良好的水分条件及独特的生态环境,对耕地保护有积极的作用。

2.3.1 地面土壤干层厚度变化 由表 1 可知,降雪后 14 d,原始沙地在有积雪覆盖条件下,表层仍有  $1.5\text{ cm}$  左右的土壤干层,不同坡向的土壤干层厚度差异不显著。降雪后 40 d,沙地表层积雪溶化后,阳坡和平地土壤干层厚度增加,尤其是阳坡,随着积雪融化,土壤干层的厚度达到  $6.4\text{ cm}$ ,为风力侵蚀提供了基础条件。而土地整治后,在砒砂岩覆盖条件下,降雪后 14~40 d 内,冻结层从地表就开始出现,土壤干层始终不存在。

表 1 地面土壤干层厚度 cm

时间	坡面类型	阴坡	阳坡	平地
降雪后 14 d	原始沙地	1.6	1.5	1.5
	整治土地	0	0	0
降雪后 40 d	原始沙地	1.0	6.4**	2.0
	整治土地	0	0	0

注: \*  $p < 0.05$ ,表示差异显著; \*\*  $p < 0.01$ ,表示差异极显著。

2.3.2 积雪盖度和厚度变化 由图 3 可知,降雪后 14 d,坡向相同的坡面,利用砒砂岩进行土地整治的土地积雪盖度稍大于未整理的原始沙地,盖度均大于 95%,不同坡向积雪盖度差异不大;降雪后 40 d,原始沙地积雪消融较快,阳坡积雪几乎全部消融,平地盖度下降 22.2%,阴坡盖度下降 15.8%;而用砒砂岩整治后的土地积雪消融较慢,不同坡向盖度均略微下降,下降幅度在 10% 以内,盖度较沙地高出 25%~75%。

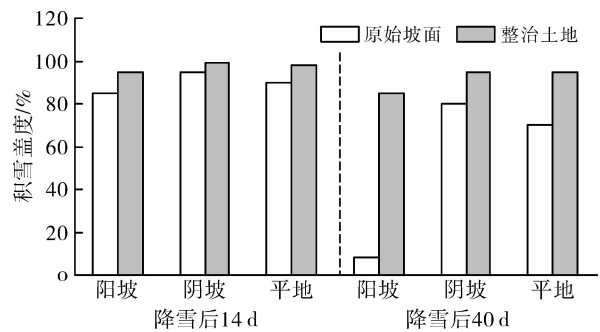


图 3 原始坡面和整治土地积雪盖度变化

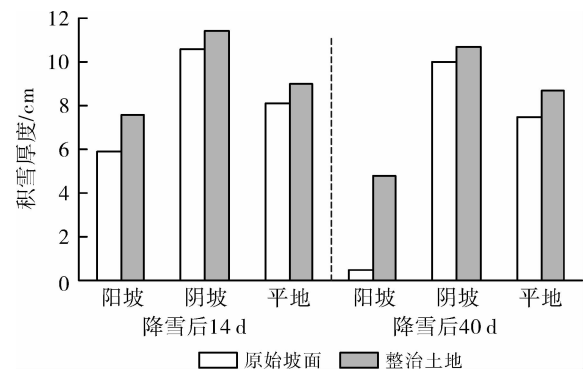


图 4 原始坡面和整治土地积雪厚度变化

根据图 4,降雪后 14 d,坡向相同的坡面,整治后的土地积雪厚度大于未整理的原始沙地,阳坡的差异最为明显。降雪后 40 d,阳坡积雪厚度下降较为显著,原始坡面阳坡积雪几乎全部消融,厚度在  $0.5\text{ cm}$  以下。

## 3 结论与讨论

(1) 冻土中的含水量是影响冻结和融化过程的一个非常重要的指标。由于含水量的差异,沙地和砒砂岩与沙复配土壤冻结层形成具有差异。沙地表面的含水量小,因此在地表以下一段距离内形成冻结层,沙地土壤表层通常会形成干沙层。而砒砂岩与沙复配土壤由于有较好的保水持水性,表层含水量高,因此土壤的冻结层在地表形成。因此,砒砂岩与沙复配表层冻结层的形成,使冬季土壤的防风蚀能力显著增强。

(2) 复配土壤和沙的冻土深度变化与温度变化规律相似,但最深冻土深度比温度表现出一定的滞后性。复配土壤和沙冻结均始于11月上旬,1月下旬沙地达到最大冻深98.0 cm;复配土壤达到最大冻深116.0 cm。两者冻结层2月上旬开始融解,沙地整个剖面融解时间大概为30 d,而复配土壤冻结层的融解时间比沙地要晚1周左右。复配土壤含水量高,因此冻结深度较大,同时较干的沙比热小、导热快、吸热和放热均很强<sup>[14]</sup>,因此沙土的融解速度大于复配土壤。

(3) 沙地导热率高,在冬季,积雪融化快,并且由于沙地土壤非毛管孔隙多,导水性能好,融化的雪水很快下渗至沙层中,土壤干层厚度大,尤其是阳坡;而砒砂岩质地较细,毛管孔隙发达,保水性好,导水性差<sup>[15]</sup>,砒砂岩与沙复配土壤导热率低于沙地,地表含水量高,随气温下降冻结,因此表层积雪融化缓慢,积雪盖度和厚度要高于沙地。积雪的保护显著提高了起沙风速,降低了表层土壤的起沙。土壤冻层和积雪在复配土壤地表形成了两层保护层,减少了休闲期的风蚀作用。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 张卫华,韩霁昌,王欢元,等. 砒砂岩对毛乌素沙地风成沙的改良应用研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10):122-127.
- [2] 韩霁昌,刘彦随,罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. 中国土地科学, 2012, 26(8): 87-94.
- [3] 王欢元,韩霁昌,罗林涛,等. 砒砂岩与沙复配成土过程中沙的调控作用[J]. 土壤通报, 2014, 45(2):286-290.
- [4] 张露,韩霁昌,罗林涛,等. 砒砂岩与风沙土复配土壤的持水特性研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2014, 42(2):207-214.
- [5] 于博,赵兰坡,王鸿斌,等. 松辽平原高产农田土壤结构性对冻结的响应及机理研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):172-177.
- [6] 任伊滨,任南琪,李志强. 冻融对中国高纬度地区湿地水环境及土壤养分的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(2):269-274.
- [7] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52(1):1-8.
- [8] 王展,张玉龙,虞娜,等. 冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(1):83-88.
- [9] 郑秀清,樊贵盛,邢述彦. 水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动[M]. 北京:地质出版社, 2002.
- [10] 周幼吾,郭东信. 我国多年冻土的主要特征[J]. 冰川冻土, 1982, 4(1):1-19.
- [11] 程慧艳,王根绪,王一博,等. 黄河源区不同植被类型覆盖下季节冻土冻融过程中的土壤温湿空间变化[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2008, 44(2):15-21.
- [12] 申向东,刘铁军,王丽萍,等. 阴山北部地表土层冻融特性分析[C]. 第15届全国结构工程学术会议论文集:第II册, 2006:303-306.
- [13] 陈晓飞,张玉龙,堀野治彦,等. 应用TDR对土壤含水量及土壤冻结融解深的计测[J]. 灌溉排水, 2002, 21(3):71-74.
- [14] 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.
- [15] 殷丽强,王涛,梁月. 砒砂岩地区沙棘人工林地土壤水物理性质研究[J]. 国际沙棘研究与开发, 2008, 6(1):9-12.