

干密度和含水量影响下非饱和黄土 正冻结过程研究

高 远, 张小辉, 张彩阳

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 通过自制的冻结与监测装置, 进行了不同干密度和含水量条件下非饱和黄土的温度变化试验。试验结果显示, 当干密度增大, 土壤的导热能力将被削弱, 随着冻结过程的不断进行该影响因素的作用不断增强。含水量对冻结中土体温度的变化也存在显著影响; 含水量较高的土体降温更为剧烈, 稳定状态时的温度也更低。通过对试验数据的分析, 进一步得到了不同干密度与含水量的土体温度与温度梯度同冻结位置和时间的分段函数关系。回归结果表明: 冻结初期, 含水量是影响土体温度与温度梯度的主要因素, 含水量越大降温越剧烈; 而在冻结的后续阶段, 温度与温度梯度的变化则受干密度与含水量的共同影响, 随二者的增大土体降温程度逐渐减弱。

关键词: 黄土; 冻结; 温度; 含水量; 干密度

中图分类号: S342.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0115-08

Temperature in freezing unsaturated loess affected by dry density and water content

GAO Yuan, ZHANG Xiao-hui, ZHANG Cai-yang

(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: By using developed test and monitoring equipment, the experiment was carried on to study on the temperature of unsaturated loess under different conditions of dry density and water content. The test data revealed that the heat conduction of soil would be impaired when dry density increased, and the effect enhanced gradually as time went on. Water content also had obvious influence to change the temperature of freezing soil. For the soil of higher water content, the temperature dropped sharper; and was lower at the steady stage. Regression analysis was carried out on the test results which showed that soil temperature and temperature gradient appeared staging a function with freezing position and time. It was pointed out that water content was the main factor of the temperature and temperature gradient of loess in early freezing stage. And this dropped more severely with increasing water content. While the change of soil temperature was the result of the combined effect of dry density and water content in late freezing stage. And with increase of both them the degree of dropping temperature of soil was decreased.

Keywords: loess; freezing; temperature; water content; dry density

干旱、半干旱地区的非饱和黄土由于所处地理环境的特殊性, 土壤本身长时间的与外界接触, 必然会受到各种环境因素的影响, 温度变化是其中一个很常见也很重要的影响因素。黄土地区的土壤随外界温度的降低将会产生比较剧烈的温度波动, 进而引发土体中的水分迁移, 土壤物理性质改变, 上部土体冻胀等^[1-5]。这些冻结过程中的伴生现象常常会导致一系列的冻害问题, 例如土壤温度降低至冻结温度后, 土体中水结晶成冰填充了孔隙通道, 使得农作物根系无法正常发育, 同时将会影响植物对水分

与养分的吸收; 对于干旱地区的非饱和黄土, 在土壤冻结过程中水分迁移运动使土中盐分富集在土体表面, 当气温升高、水分蒸发以后就会诱发土壤盐渍化, 严重危害农作物生长, 进而影响比较脆弱的干旱、半干旱地区的生态环境; 当土壤冻结以后, 农业生产也会受到较大阻碍, 人类农业活动的开展和农业器具使用都会受到不同程度的影响^[6]。因此, 研究土壤温度的变化是预防冻害等各类问题的基础, 也是研究水分迁移与土体次生盐渍化的重要组成部分^[7]。在以往的试验研究中通常只通过监测的方法

获取土壤温度随时间变化的函数关系,并没有详细考虑土壤本身物理指标对温度变化以及温度梯度变化的影响^[8-9]。本文将通过大量的室内试验数据,讨论干旱、半干旱地区非饱和黄土温度改变与深度、时间、含水量以及干密度之间的关系。

1 材料与方法

1.1 采样方法

本试验所用黄土取自西安市北郊。取土时,在该区的 50 m × 50 m 范围内布置了 10 个采集点,在每个采集点的表层 1 ~ 2 m 处取样,并将所取土壤均匀混合,分装于 10 个隔水袋中,以备使用。土壤的原始参数为:初始含水率 19.4%,初始干密度 1.45 g·cm⁻³,液限指数 30.36,塑限指数 17.79,属于粘土,土壤类别为褐土^[10]。

1.2 试样制备

按照试验设计将所取土壤配置成不同初始含水率的土样,装于高为 60 cm、内径为 24 cm 的试样桶中,并分层夯实至 55 cm,可以得到具有不同初始含

水量和不同干密度的土样。在试样桶的一侧每隔 5 cm 设置一个温度检测孔,在开孔处安装有温度传感器用于观测土体温度的变化;试样桶外侧紧密设置了厚度为 15 cm 的保温隔热层,起到隔绝内、外部热量交换的作用,同时也保证了温度在一维竖向的传播;在试样的顶部和底部设置隔水层用来防止土壤试样中水分的挥发,使得试验在封闭系统下进行。具体的试验装置如图 1 所示。

进行室内试验时,将重塑黄土分别制成含水量为 13.8%、16.2%、19.4% 和干密度分别为 1.3、1.5 g·cm⁻³ 及 1.65 g·cm⁻³ 的土样;在每个试件底端施加 -11℃ 的低温,上端温度由恒温室控制在 20℃ ~ 25℃,具体的土样指标如表 1 所示。试验初期每隔 1 ~ 2 h 监测一次试件的温度变化,待土壤变化趋于稳定后每隔 24 h 监测一次,每个试样的观察时间为 14 d。根据实测数据,建立冻结时间、距离冷端位置与土壤温度的三维坐标关系,图 2 ~ 图 10 给出了表 1 中各土壤试样在时间和位置坐标下的温度变化曲面图。

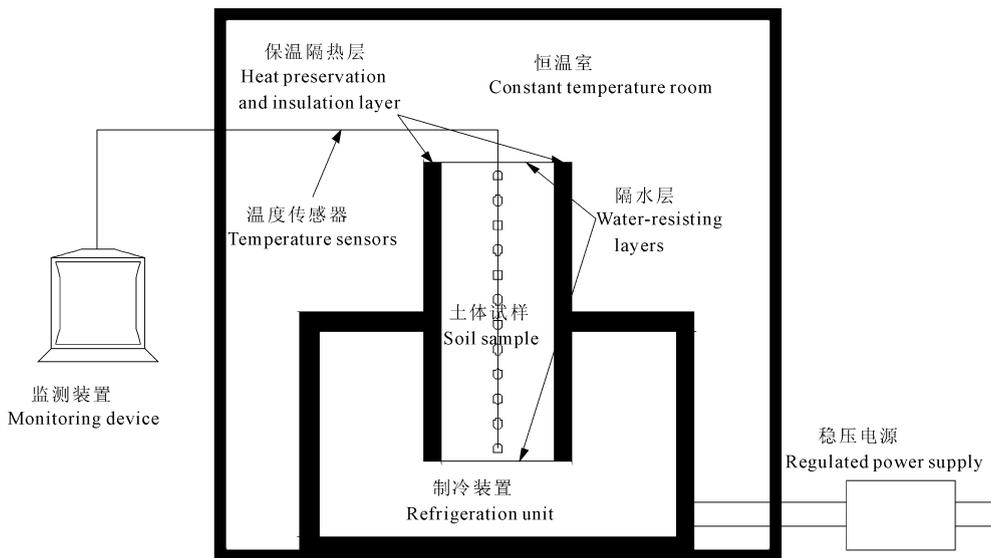


图 1 试验装置图^[11]

Fig.1 Test device

2 结果与分析

2.1 不同干密度与含水量下非饱和黄土的温度变化

从图 2 ~ 图 10 可以看出,每一种干密度和含水量所对应的土样温度变化均存在明显的三个阶段: I 阶段,即初始冻结阶段,该阶段主要集中在热端的土体,土中整体温度降低的较慢,土样整体处于未冻结状态,该阶段在整个温度变化曲面内所占面积较小,通常只集中在冻结初期的 0 ~ 8 h 内; II 阶段,剧

烈降温阶段,土中温度下降速度骤增,冷端的土体降温幅度最大,并逐渐接近冻结温度,曲面的陡降趋势明显,该阶段的温度变化通常集中在冻结后的 8 ~ 24 h 内; III 阶段,平稳过渡阶段,土中温度变化趋于平缓,24 h 以后整个土样的温度变化接近线性,同一土层不同时刻的温度呈近似平行变化,冷端在冻结 100 h 后出现温度降低的拐点,即整个土体的温度逐渐稳定下来,这个阶段在土样温度变化曲面中所占面积最大。

表 1 试验土样

Table 1 Tested soil samples

土样编号 Code	含水量 Water content /%	干密度 Dry density /(g·cm ⁻³)	温差 Temperature difference/°C
1	13.8	1.3	31
2	16.2	1.3	29
3	19.4	1.3	30
4	13.8	1.5	32
5	16.2	1.5	32
6	19.4	1.5	28
7	13.8	1.65	31
8	16.2	1.65	29
9	19.4	1.65	28

2.2 干密度与含水量对非饱和黄土降温过程的作用机理

依据上述结论,进一步分析干密度和含水量对非饱和黄土降温过程的作用机理。

首先,对比相同含水量、不同干密度的土样。由导热系数的计算公式可知^[8],干密度大的土壤导热能力优于干密度小的土壤,即干密度越大土体的热量传递越畅通^[11];但是干密度大的土样,单位体积中的水分含量也相应增大,在冻结的过冷阶段,土体中水会释放更多的热能,将阻碍整个试样的温度下降,因此须由试验确定干密度的最终影响结果。图 2、5、8 表明,相同时间和相同位置处的土样,干密度较小的土样温度变化较快,干密度较大的土样温度变化的较为平缓,尤其是在冻结 150 h 以后,干密度为 1.5 g·cm⁻³的非饱和黄土试样的温度变化已经非常微小;这说明随着干密度的增大,土壤的导热能力将被削弱。对比含水量为 16.2% 和 13.8% 的两组土样,同样可以得到上述结论。

其次,对于相同干密度,不同含水量的土样,正冻结阶段中,水分迁移等流体运动使得高含水量的土壤对流换热更为剧烈^[9],因此该过程将加速土体温度的降低;但是含水量较高的土壤,温度改变所要消耗的热量也越大,且在过冷阶段也存在土体中水大量放热的问题^[12],这些热力学特性都将影响土体的降温进程,所以也需通过试验确定含水量对温度变化的作用。如图 2~4、图 5~7 和图 8~10 所示,含水量较高的土壤温度降低的更加剧烈,试验结束后的冻结温度也更低,因此就含水量的单一因素分析,含水量越高越利于非饱和黄土的降温。

为综合研究干密度和含水量对土壤温度变化的影响,对上述各土样分别进行拟合分析,得到非饱和黄土温度与冻结时间和位置之间的关系式:

$$T = (\theta_1 \ln t + \theta_2)z^2 + (\theta_3 \ln t + \theta_4)z + \theta_5 t + \theta_6, \quad 0 < t < 24h \quad (1)$$

$$T = \alpha z + 0.0001t^2 + \beta t + \gamma, \quad t \geq 24h \quad (2)$$

式中, T 为土壤温度(°C); z 为深度坐标(cm); t 为冻结时间(h); $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \alpha, \beta, \gamma$ 为拟合参数,各参数如表 2、3 所示(表中 r 表示拟合参数计算结果与实测结果的相关系数)。

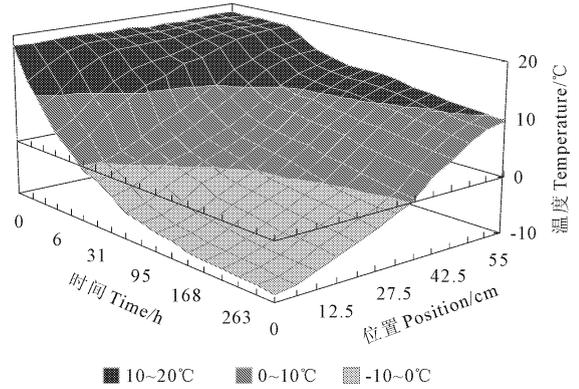


图 2 $\rho_d = 1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 19.4\%$ 的土样温度变化曲面
Fig.2 Curved surface of temperature for $\rho_d = 1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 19.4\%$

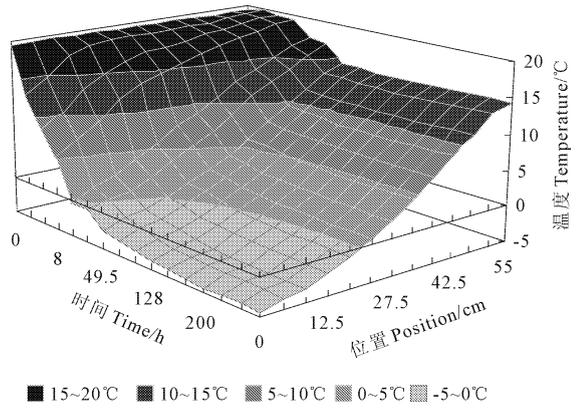


图 3 $\rho_d = 1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 16.2\%$ 的土样温度变化曲面
Fig.3 Curved surface of temperature for $\rho_d = 1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 16.2\%$

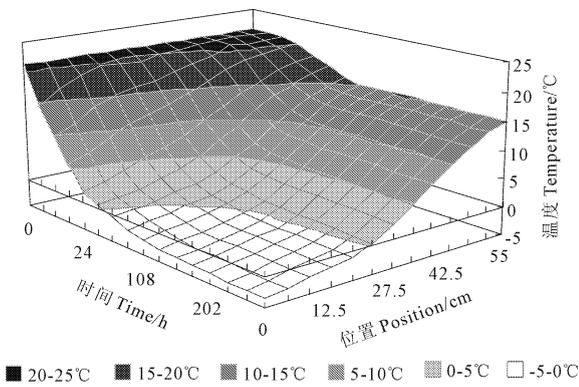


图 4 $\rho_d = 1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 13.8\%$ 的土样温度变化曲面
Fig.4 Curved surface of temperature for $\rho_d = 1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 13.8\%$

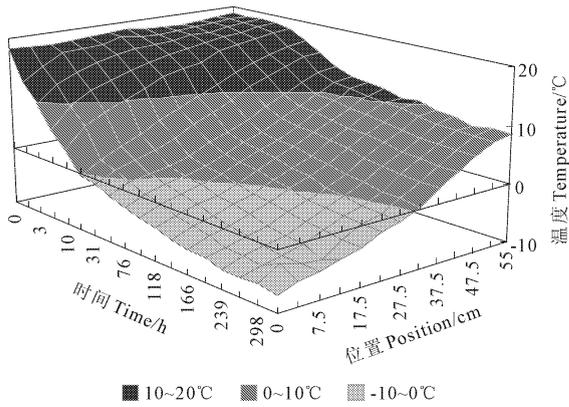


图 5 $\rho_d = 1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 19.4\%$ 的土样温度变化曲面
Fig.5 Curved surface of temperature for $\rho_d = 1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 19.4\%$

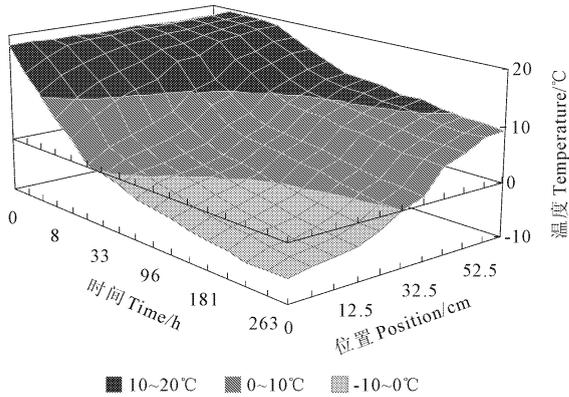


图 6 $\rho_d = 1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 16.2\%$ 的土样温度变化曲面
Fig.6 Curved surface of temperature for $\rho_d = 1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 16.2\%$

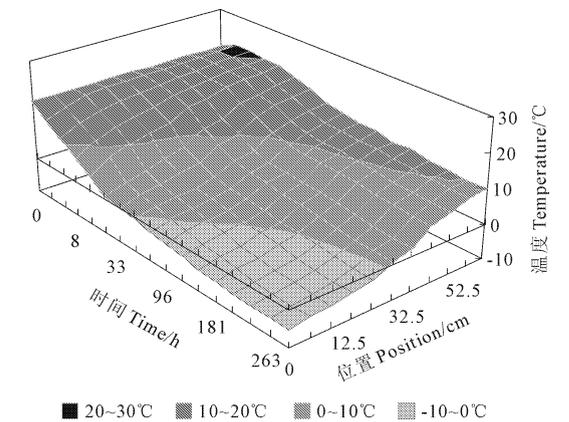


图 7 $\rho_d = 1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 13.8\%$ 的土样温度变化曲面
Fig.7 Curved surface of temperature for $\rho_d = 1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 13.8\%$

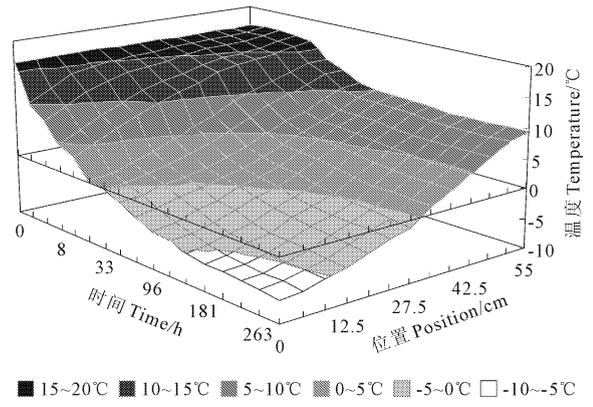


图 8 $\rho_d = 1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 19.4\%$ 的土样温度变化曲面
Fig.8 Curved surface of temperature for $\rho_d = 1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 19.4\%$

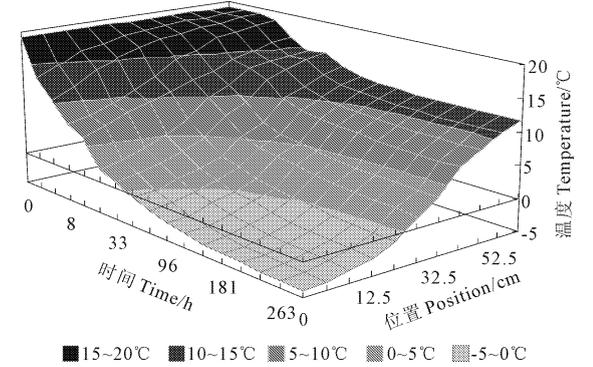


图 9 $\rho_d = 1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 16.2\%$ 的土样温度变化曲面
Fig.9 Curved surface of temperature for $\rho_d = 1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 16.2\%$

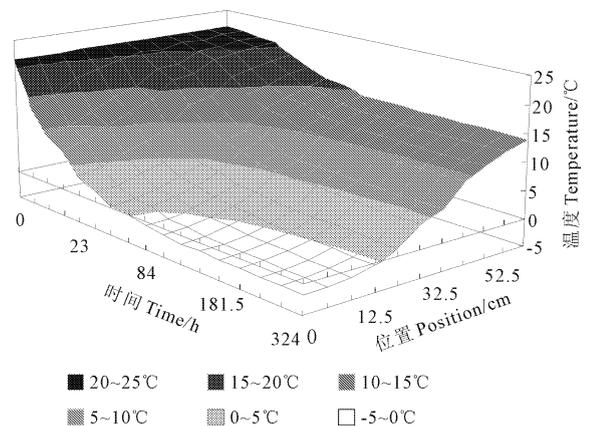


图 10 $\rho_d = 1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 13.8\%$ 的土样温度变化曲面
Fig.10 Curved surface of temperature for $\rho_d = 1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 13.8\%$

由公式(1)、(2)和拟合参数列表 2 可知,在冻结初期($0 < t < 24\text{h}$),土样温度变化的剧烈程度随着干密度的增大而减弱,随含水量的增大而增强,随时间的推移呈近似线性降低,随冻结位置加深呈非线性

性的增大;在冻结 24 h 之后,土壤温度降低速度减缓,各影响因素的作用减弱。以上结论表明,拟合公式的变化趋势同本文封闭系统的试验结果基本一致。

2.3 不同冻结阶段各因素的影响权重分析

对比表 2 的各数据可以看出, $\theta_1 \sim \theta_3$ 的数量级较小, 因此对土体的温度变化影响较小, θ_6 为常量参数, 所以参数 θ_4, θ_5 为反映土体温度的主要参数。随干密度的增大 θ_4 明显减小, 因此该系数以反映干密度的影响为主; θ_5 则随干密度和含水量整体变化, 所以该系数综合反映了干密度和含水量对温度变化的影响。

将式(1)、(2) 分别对位置和时间求导, 得到非饱和黄土正冻结过程的温度梯度变化公式:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial z} = 2(\theta_1 \ln t + \theta_2)z + \theta_3 \ln t + \theta_4 \\ \frac{\partial T}{\partial t} = (\theta_1 z^2 + \theta_3 z)/t + \theta_5 \end{cases}, 0 < t < 24h \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \\ \frac{\partial T}{\partial t} = 0.0002t + \beta \end{cases}, t \geq 24h \quad (4)$$

图 11 ~ 图 19 列举了不同干密度和含水量的土壤温度梯度变化曲面图。公式(3)中, 参数 θ_1, θ_2 的绝对值较小, 所以在正冻结的早期, 试样的温度梯度 $\partial T/\partial z$ 和 $\partial T/\partial t$ 主要受参数 $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ 的影响; 且对比表 2 中不同干密度和不同含水量土样对应的 $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ 的参数值与图 5 ~ 图 7 中的曲面部分, 可知, 含水量是影响其降温过程的主要因素。在冻结后期 ($t \geq 24h$), 关于位置的温度梯度变为参数 α 的函数, 由图 11 ~ 图 19 的(a)图中温度梯度变化值的平面部分的坐标对比可知, 干密度成为冻结后期关于位置的温度梯度的主要影响因素; 关于时间的温度梯度 $\partial T/\partial t$ 是时间 t 和参数 β 的函数(如图 11 ~ 图 19 的(b)图的平面段所示), 而 β 主要受土壤干密度的影响, 随着干密度的增大, 温度梯度逐渐减小, 且只有当干密度较小时, 含水量的差异才会引起土壤温度梯度相对较大的变化, 随着干密度的增大, 含水量的影响逐渐降低。

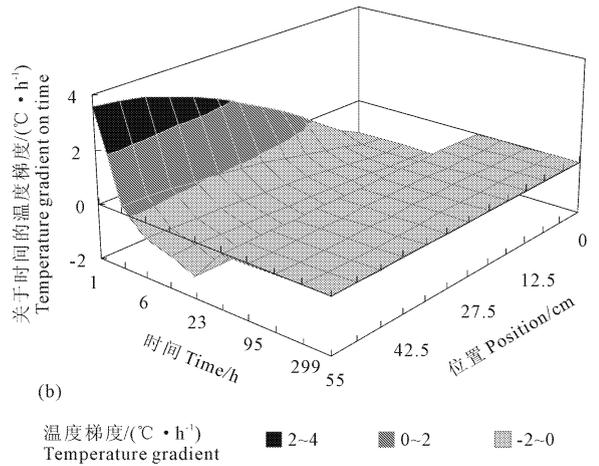
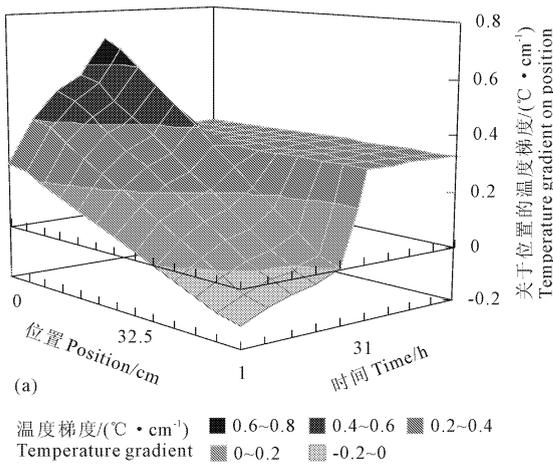


图 11 $\rho_d = 1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 19.4\%$ 的土样温度梯度变化曲面

Fig. 11 Curved surface of temperature gradient for $\rho_d = 1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 19.4\%$

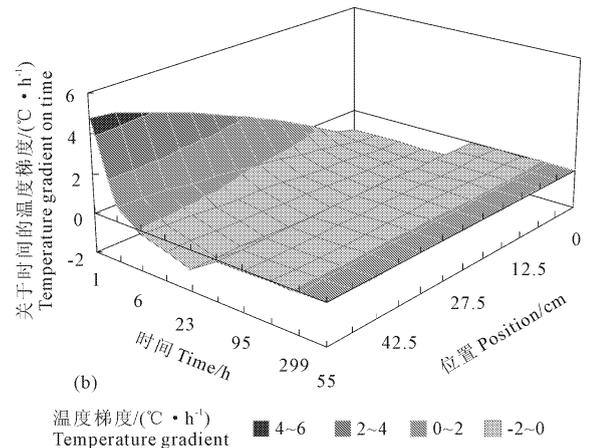
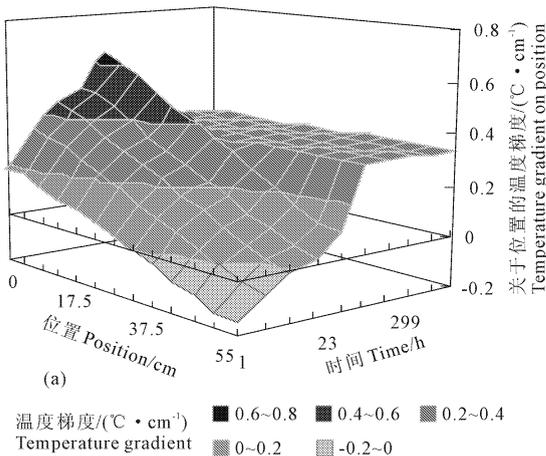


图 12 $\rho_d = 1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 16.2\%$ 的土样温度梯度变化曲面

Fig. 12 Curved surface of temperature gradient for $\rho_d = 1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}, \omega = 16.2\%$

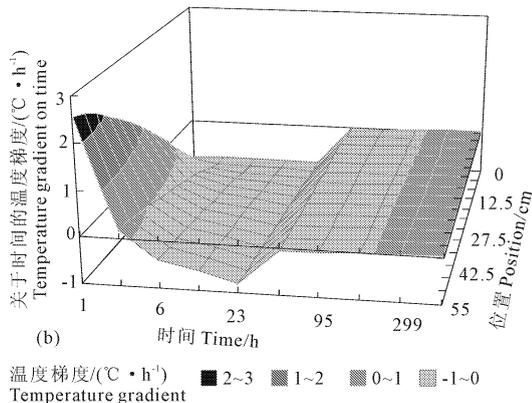
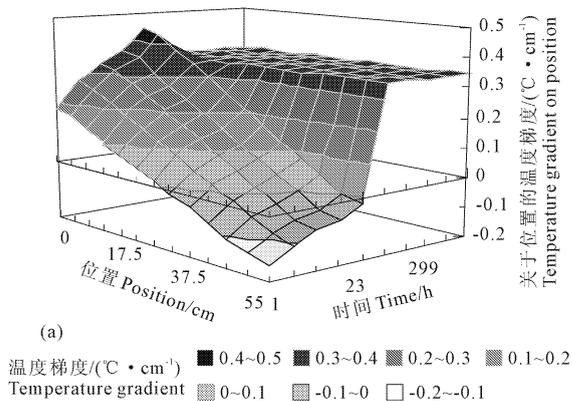


图 13 $\rho_d = 1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 13.8\%$ 的土样温度梯度变化曲面

Fig. 13 Curved surface of temperature gradient for $\rho_d = 1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 13.8\%$

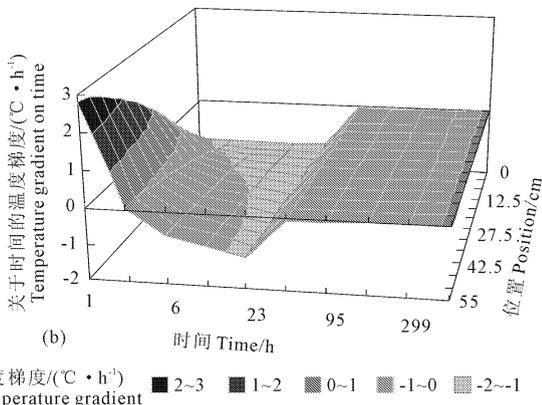
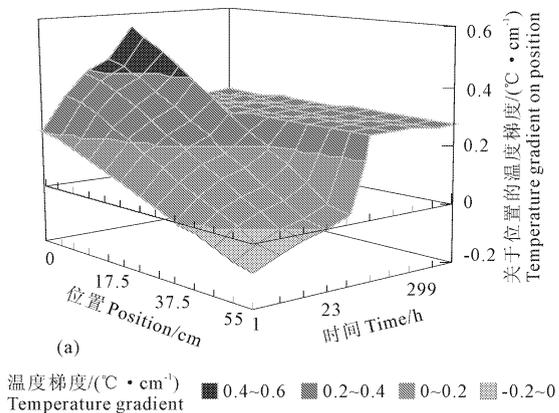


图 14 $\rho_d = 1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 19.4\%$ 的土样温度梯度变化曲面

Fig. 14 Curved surface of temperature gradient for $\rho_d = 1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 19.4\%$

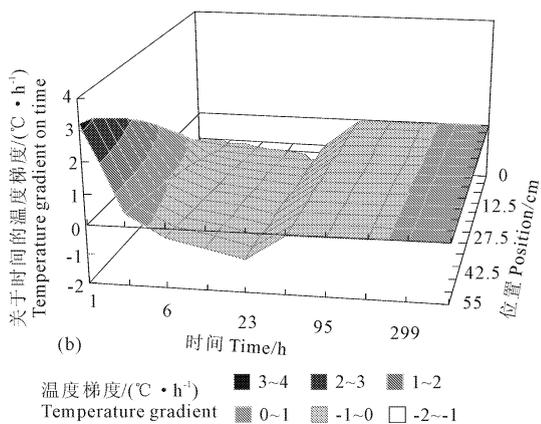
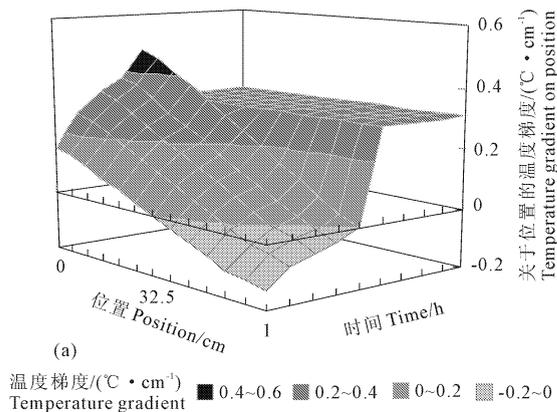


图 15 $\rho_d = 1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 16.2\%$ 的土样温度梯度变化曲面

Fig. 15 Curved surface of temperature gradient for $\rho_d = 1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 16.2\%$

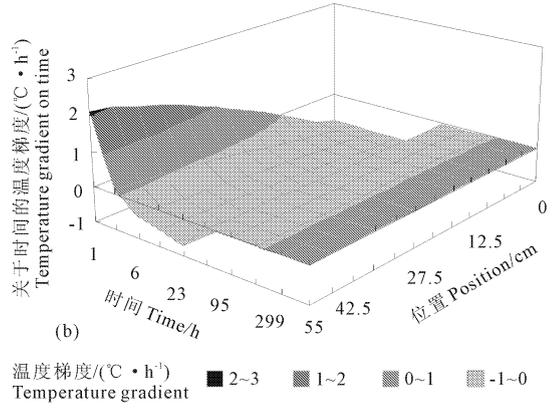
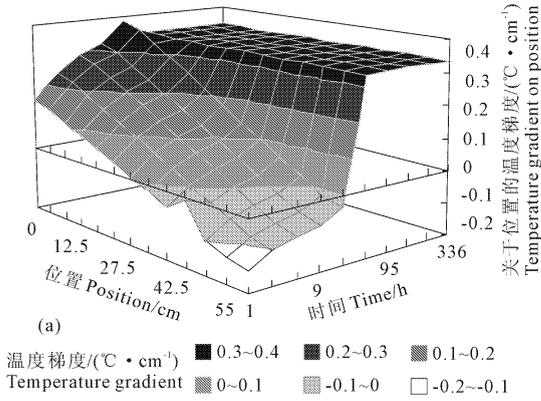


图 16 $\rho_d = 1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 13.8\%$ 的土样温度梯度变化曲面

Fig. 16 Curved surface of temperature gradient for $\rho_d = 1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 13.8\%$

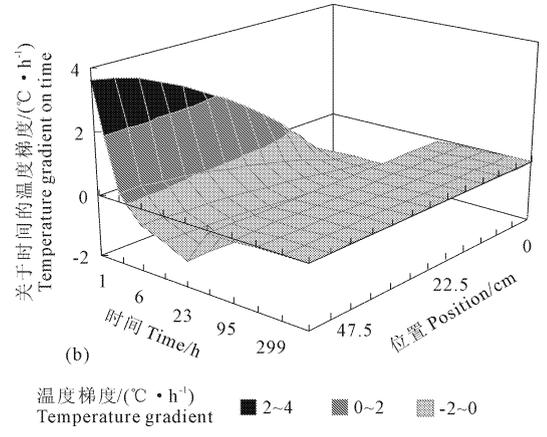
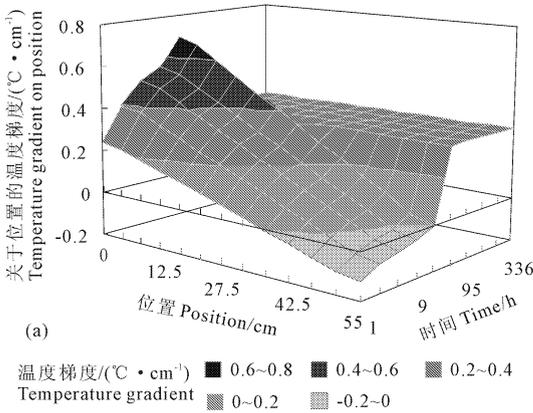


图 17 $\rho_d = 1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 19.4\%$ 的土样温度梯度变化曲面

Fig. 17 Curved surface of temperature gradient for $\rho_d = 1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 19.4\%$

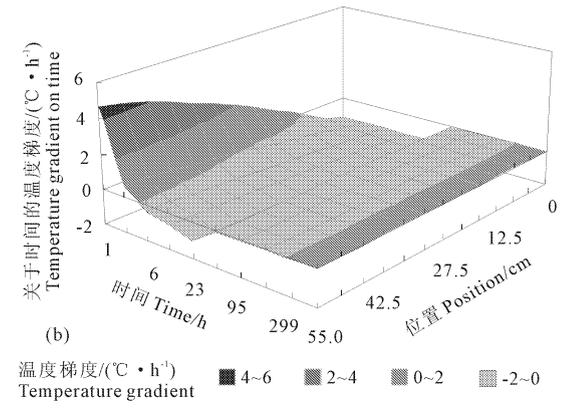
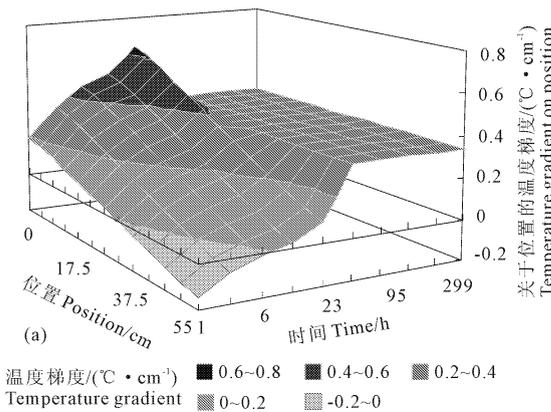


图 18 $\rho_d = 1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 16.2\%$ 的土样温度梯度变化曲面

Fig. 18 Curved surface of temperature gradient for $\rho_d = 1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\omega = 16.2\%$

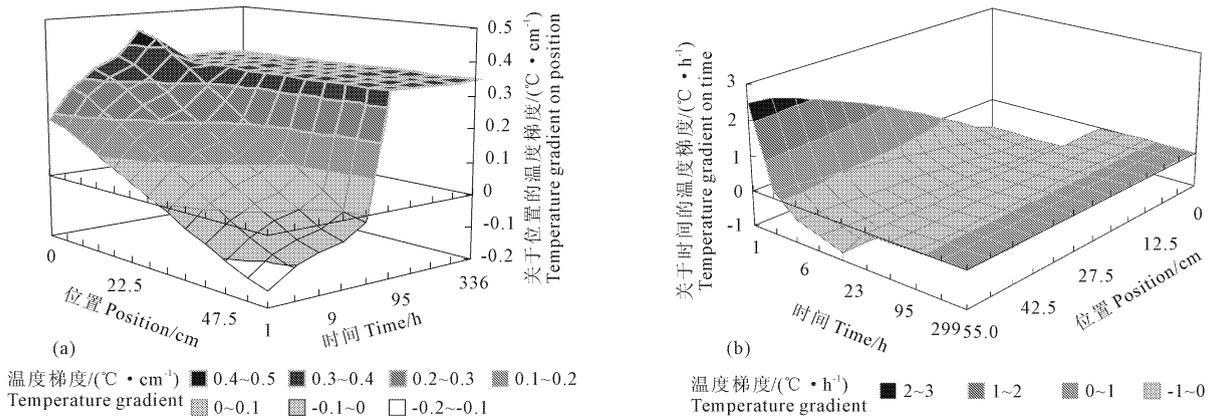


图 19 $\rho_d = 1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $\omega = 13.8\%$ 的土样温度梯度变化曲面

Fig.19 Curved surface of temperature gradient for $\rho_d = 1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $\omega = 13.8\%$

表 2 冻结初期拟合参数

Table 2 Fitting parameters in early freezing period

含水量/% Water content	参数 Parameter	干密度 Dry density /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)		
		1.3	1.5	1.65
13.8	θ_1	-0.0004	-0.000363	-0.000346
	θ_2	-0.003	-0.00268	-0.00239
	θ_3	0.0852	0.0738	0.0675
	θ_4	0.1803	0.155	0.119
	θ_5	-0.9713	-0.8678	-0.7998
	θ_6	17.313	16.961	16.569
16.2	r	0.9868	0.9971	0.9983
	θ_1	-0.000577	-0.000469	-0.000384
	θ_2	-0.00313	-0.00278	-0.00243
	θ_3	0.1405	0.103	0.0915
	θ_4	0.197	0.153	0.126
	θ_5	-1.3142	-1.037	-0.837
19.4	θ_6	16.108	15.381	14.547
	r	0.9841	0.9953	0.9974
	θ_1	-0.000967	-0.000658	-0.000305
	θ_2	-0.00327	-0.00259	-0.00251
	θ_3	0.1441	0.1108	0.0933
	θ_4	0.2416	0.2002	0.1709
13.8	θ_5	-1.3868	-1.188	-0.9113
	θ_6	15.459	14.337	12.934
	r	0.9828	0.9916	0.9983

注:冻结初期是指冻结时间在 24 h 以内的正冻结阶段。

Note: Early frozen period means the freezing period within 24 h.

表 3 冻结后期拟合参数

Table 3 Fitting parameters in late freezing period

含水量/% Water content	参数 Parameter	干密度 Dry density /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)		
		1.3	1.5	1.65
13.8	α	0.3468	0.3367	0.2911
	β	-0.0471	-0.0461	-0.0388
	γ	0.2902	1.1873	1.5549
16.2	r	0.9912	0.9954	0.9978
	α	0.3384	0.3079	0.2772
	β	-0.0558	-0.0501	-0.0486
19.4	γ	0.2056	0.9426	1.1392
	r	0.9903	0.9916	0.9948
	α	0.3302	0.2792	0.2633
13.8	β	-0.0746	-0.0653	-0.0583
	γ	0.121	0.6872	0.7243
	r	0.9897	0.9905	0.9914

注:冻结后期是指冻结时间在 24 h 以上的正冻结阶段。

Note: Late freezing period means the freezing period after 24 h.

研究的基础上,通过数据拟合进一步分析了试验结果,并得到了干密度和含水量的作用情况:在冻结初期含水量是影响土壤温度和温度梯度的主要因素,随着含水量的增大降温程度增强;在冻结的后续阶段,干密度与含水量都是温度和温度梯度变化的主要影响因素,随二者的增大土壤降温能力逐渐减弱。

参考文献:

[1] 王铁行,卢靖,岳彩坤.考虑温度和密度影响的非饱和黄土土一水特征曲线研究[J].岩土力学,2008,29(1):1-5.
 [2] 赵红岩,张旭东,王有恒,等.陇东黄土高原气候变化及其对水资源的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):262-268.
 [3] Wang Tie-hang, Hu Chang-shun, Li Ning. Numerical analysis of ground temperature in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science in China (ser. E), 2002,45(4):433-443.

3 结语

通过对不同干密度与不同含水量的非饱和黄土的温度监测,揭示了二者对土体温度变化存在影响,并得出对土壤降温过程的影响规律。在综合试验

合下茎和叶的移动率最大,产量最高。叶面积、净光合速率的变化呈先上升后下降趋势,并且在抽穗期或者开花期达到最大值,这两个时期是糜子的关键时期,通过调节这两个时期的水肥管理,增大叶面积和增强净光合速率来促进有机物质的积累,不断提高单株穗重和主穗长,从而提高糜子产量。

参考文献:

- [1] 杨武德,石建国,魏亦文.现代杂粮生产[M].北京:中国农业科技出版,2001:50-82.
- [2] 周丽娟,牟金明,谢志明,等.密度对糜子产量性状的影响[J].辽宁农业科学,2010,(1):17-19.
- [3] 徐岩,于海业.设施农业水肥耦合技术的研究进展[J].安徽农业科学,2011,39(5):2718-2721.
- [4] 潘晓莹,武继承.水肥耦合效应研究的现状与前景[J].河南农业科学,2011,40(10):20-23.
- [5] 胡凯军,赵桂琴,吴昌顺,等.麦类作物水肥耦合研究进展[J].中国农学通报,2011,27(12):7-12.
- [6] 肖自添,蒋卫杰,余宏军.作物水肥耦合效应研究进展[J].作物杂志,2007,(6):18-22.
- [7] 李国强,汤亮,张文宇.不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析[J].作物学报,2009,35(12):2258-2265.
- [8] 骆兰平,于振文,王东.土壤水分和种植密度对小麦旗叶光合性能和干物质积累与分配的影响[J].作物学报,2011,37(6):1049-1059.
- [9] 赵斌,董树亭,张吉旺.控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响[J].作物学报,2010,36(10):1760-1768.
- [10] 韩占江,于振文,王东.测墒补灌对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响[J].作物学报,2010,36(3):457-465.
- [11] 侯红乾,刘秀梅,刘光荣.有机无机肥配比比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J].中国农业科学,2011,44(3):516-523.
- [12] 阎炬,施卫明.不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(1):

- 151-157.
- [13] 蒋会利,温晓霞,廖允成.施氮量对冬小麦产量的影响及土壤硝态氮运转特性[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):237-241.
- [14] 曾宇,雷雅丽,李京.氮、磷、钾用量与种植密度对油菜产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):146-153.
- [15] 冯鹏,王晓娜,王清邴.水肥耦合效应对玉米产量及青贮品质的影响[J].中国农业科学,2012,45(2):376-384.
- [16] 郑志松,王晨阳,牛俊义,等.水肥耦合对冬小麦籽粒蛋白质及氨基酸含量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(4):788-793.
- [17] 王宇先,李清泉,刘玉涛,等.密度和施氮量对糜子产量及综合性状的影响[J].中国农学通报,2012,28(36):188-194.
- [18] 韦泽秀,梁银丽,井上光弘,等.水肥处理对黄瓜土壤养分、酶及微生物多样性的影响[J].应用生态学报,2009,20(7):1678-1684.
- [19] 高庆荣,孙兰珍,刘保申.杂种小麦花后干物质积累转运动态和分配[J].作物学报,2000,26(2):163-170.
- [20] 龚金龙,胡雅杰,龙厚元,等.大穗型杂交粳稻产量构成因素协同特征及穗部性状[J].中国农业科学,2012,45(11):2147-2158.
- [21] 吴桂成,张洪程,钱银飞,等.粳型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究[J].中国农业科学,2010,43(2):266-276.
- [22] 刘万代,尹钧,朱高纪.剪叶对不同穗型小麦品种干物质积累及籽粒产量的影响[J].中国农业科学,2007,40(7):1353-1360.
- [23] 李邵,薛绪掌,郭文善,等.水肥耦合对温室盆栽黄瓜产量与水分利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(2):376-381.
- [24] 贾根良,张社奇,代惠萍,等.拔节后糜子干物质积累及分配规律研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,37(4):86-90.
- [25] Divis J. The dynamic production of dry matter silage maize in less favorable temperature conditions[J]. Fytotec - hnicka Rada, 1998, 15(1):61-69.

(上接第122页)

- [4] 王铁行,王娟娟,张龙党.冻结作用下非饱和黄土水分迁移试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2012,44(1):7-14.
- [5] Kay B D M, Fukuda. The importance of water migration in the measurements of the thermal conductivity of unsaturated frozen soils[J]. Cold Region Science and Technology, 1981,(5):95-106.
- [6] 原国红.季节冻土水分迁移的机理及数值模拟[D].吉林:吉林大学,2006.
- [7] 张婷.人工冻土冻胀、融沉特性试验研究[D].南京:南京林业大学,2004.
- [8] 齐吉琳,马巍.冻土的力学性质及研究现状[J].岩土力学,2010,31(1):133-143.
- [9] 张家懿.青藏高原多年冻土区细颗粒土的分类[M].北京:科学出版社,1983.
- [10] 陈肖柏.土冻结作用研究近况[J].力学进展,1991,21(2):226-235.
- [11] 徐学祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,2010.
- [12] 王铁行,刘自成,卢靖.黄土导热系数和比热容的实验研究[J].岩土力学,2007,28(4):655-658.
- [13] 孙义刚.环境因素对膨胀土边坡内温度场、湿度场影响的模型试验研究[D].南宁:广西大学,2007.
- [14] Li Ning, Chen Bo, Chen Feixiong. The coupled heat-moisture-mechanic model of the frozen soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2000,31(3):199-205.
- [15] 李述训,程国栋,刘继民.兰州黄土在冻融过程中水热输运实验研究[J].冰川冻土,1996,18(4):319-324.