

近稳定光源照射下干沙层的形成特征及剖面水汽运移阻力研究*

李文莉^{1,2,3}, 杨泽元^{2,4,5}, 范立民^{1,3}, 史晓琼⁶, 张艳娜²

(1. 陕西省地质环境监测总站, 西安 710054; 2. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054;
3. 矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 西安 710054; 4. 教育部旱区地下水文与生态效应重点实验室, 西安 710054;
5. 陕西省地下水与生态环境工程研究中心, 西安 710054; 6. 中国核工业集团二〇三研究所, 西安 710054)

提 要: 干沙层是干旱半干旱地区土-气界面的重要且普遍的现象, 影响着土壤蒸发及地表植被的生长。本文以毛乌素沙地风积沙为研究对象, 通过室内物理试验测定近稳定光源照射下土壤剖面不同深度的温度、含水率、相对湿度、基质势等物理量, 观测不同水位埋深干沙层的极限厚度。通过对观测数据的分析表明, 包气带剖面上各物理量的变化曲线均在干沙层底边界突变, 且在干沙层底部存在厚约 5cm 的过渡带, 使得主要水分运移方式由液态水运移向气态水运移过渡。通过探讨土壤表面水汽运移的空气动力阻力 r_a 、干沙层中水汽运移阻力 r_d 二者与干沙层厚度 Z_d 的关系可知, 随着干沙层厚度的增加, r_a 与 r_d 增减趋势相反。(i) $Z_d \leq 20\text{mm}$ 时, 土壤蒸发主要受限于土壤表面的空气动力阻力 r_a ; (ii) $Z_d > 20\text{mm}$ 时, 蒸发主要受控于干沙层中的水汽运移阻力 r_d ; (iii) $Z_d > 100\text{mm}$ 时, r_a 对蒸发的影响很小, 可忽略。

关键词: 干沙层; 突变; 过渡带; 水汽运移阻力; 毛乌素沙地

我国西北沙漠地区气候干旱, 降水稀少, 蒸发强烈, 在强烈日照作用下, 地表形成极其干燥的表面沙层, 即干表层^[1] (Dry Surface Layer, “DSL”, 又称“干沙层”)。土壤蒸发干燥依赖大气蒸发需求和地表与大气之间的水汽和热量的交换^[1-4]。在土壤逐渐干燥的过程中, 土壤表面水分低于残余含水率, 蒸发受到强烈抑制, 当液态水力连续性遭到破坏后, 液态水弯液面向土壤内部退化形成新的干燥面, 干沙层形成, 蒸发受限于土壤中水汽的扩散^[5-9]。国内外学者开展了大量的野外和室内模拟试验研究干沙层的形成发展规律, 得出干沙层达到一定厚度时, 能够有效地抑制土壤中水分的蒸发^[5-12]。Hillel 和 Campbell 提出液态水从土壤下部向上运移在干沙层底部停止, 此时汽化发生在干沙层底部, 干沙层的形成增大了水汽扩散的距离而降低了蒸发率。冯起、刘新平、小林哲雄等人均证实了这一理论, 并初步提出了干沙层与蒸发量的量化关系, 多为线性关系^[8-13]。Yamanaka 利用稳定同位素追踪方法, 探讨土壤剖面蒸发区域的动态特征^[8], Hirota、Yamanaka 等多位学者尝试量化干沙层的形成发展对蒸发的抑制作用, 提出了土壤水汽运移阻力的概念, 通过含水率或者干沙层厚度等参数近似表达阻力大小^[8,9,14]。同时, Yamanaka 等人将干沙层形成后土壤蒸发受到的阻力分为土壤表面水汽运移的空气动力阻力和干沙层中的水汽运移阻力, 并给出了二者的量化公式, 但并未探讨二者对蒸发抑制的相对贡献^[8,9,14]。前人的研究主要集中在野外环境下沙漠区干沙层的形成发展规律, 存在多种外在影响因素, 且将干沙层形成过程与地下水位埋深关联起来的系统研究尚未进行, 干沙层厚度与蒸发量、水汽运移阻力的量化关系还需进一步探讨。

*收稿日期:

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272247); 教育部留学回国人员科研启动基金项目 (2013C0290418); 中央高校基本科研业务资助项目 (2013G1502031; 2014G2290018)

作者简介: 李文莉 (19XX-), 女, X 族, 山西运城人, 硕士, 助理工程师, 主要从事沙地水分运移方面的研究。
E-mail: XXXXX@qq.com

通讯作者: 杨泽元 (19XX-), 男, X 族, 重庆合川人, 副教授, 主要从事地下水与生态环境关系研究。E-mail: XXXXX@126.com

1 试验设计及计算方法

1.1 试验设计

将风积沙装填在高 2.27m，直径 61.8cm，厚 5cm 的蒸渗柱内，蒸渗柱由双层玻璃钢材料（壁厚 1cm）制成，中间夹裹 3cm 厚的橡塑海绵，增强隔热效果^[15]。采用浴光灯在蒸渗柱顶部照射，通过改变灯的实际功率控制地表温度，利用马氏瓶控制地下水位埋深^[15,16]。在土壤剖面上安装传感器观测不同深度的含水率、基质势、温度及相对湿度（见表 1）。同时，在沙层表面以上 5cm 处安装温湿度传感器，观测空气中温湿度。由于干湿沙层颜色有明显差异，因而在蒸渗柱顶部镶嵌有机玻璃窗口（长 60×宽 8cm）观测干沙层厚度^[15]。试验装置及仪器参数如图 1 所示。

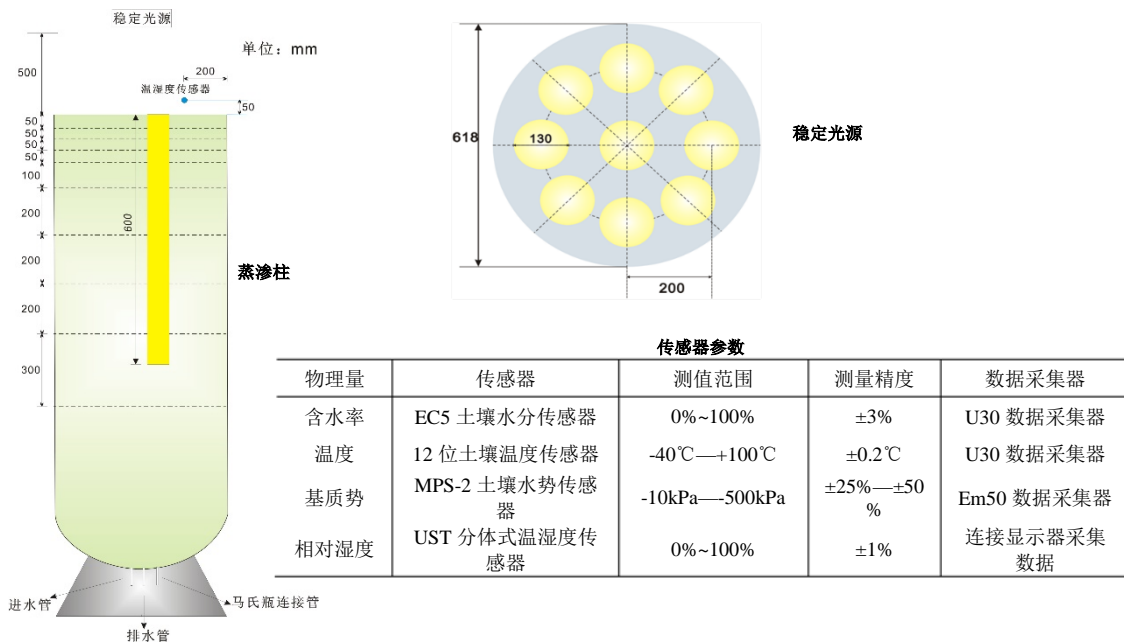


图 1 试验装置及仪器参数
Figure 1 The test apparatus and instrument parameters

表 1 传感器安装深度
Table 1 The installed depth of instruments

传感器	安装深度 (cm)									
温度	0	5	10	15	20	30	50	70	90	120
含水率	0	5	10	15	20	30	50	70	90	120
基质势	0	5	10	15	20	30				
相对湿度	安装在饱和毛细带以上区域									

1.2 计算方法

1.1.1 计算公式

(1) 水汽密度

根据公式 (1)、(2)，利用实测包气带剖面相对湿度和温度来计算水汽密度^[14]。

$$\rho_{sv} = \frac{\exp\left(31.3716 - \frac{6014.79}{T} - 7.92495 \cdot 10^{-3}T\right)}{1000T} \quad (1)$$

$$\rho_v = \rho_{sv} * Hr \tag{2}$$

式中： ρ_{sv} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 ρ_v ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 分别为温度 T(K)时的饱和水汽密度和实际水汽密度，Hr (%) 为相对湿度。

(2) 水汽运移阻力

.....

2 结果与分析

2.1 土壤剖面各物理量变化规律

通过试验，实测干沙层极限厚度 (Z_{dmax}) 如图 2 所示。 Z_{dmax} 与地下水位埋深(Depth of the Water Table ,DWT)呈对数函数关系 ($r=0.974>r(5-2,0.01)=0.959$)，即随着 DWT 的增大， Z_{dmax} 增长幅度逐渐减小。

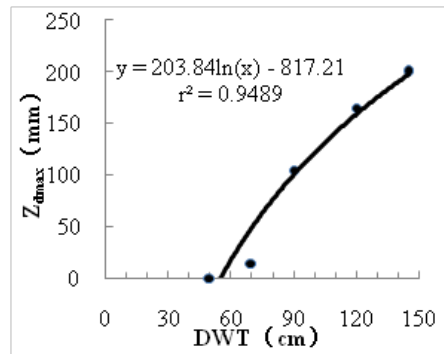


图 2 干沙层极限厚度与水位埋深关系曲线

Figure 2 The curve of thickness of DSL in different depth of the water table

干沙层的形成发展影响着土壤剖面温度、含水率、基质势、水汽密度等物理量的分布，以水位埋深 50、70、120cm 为例，分析剖面各物理量的变化规律。

.....

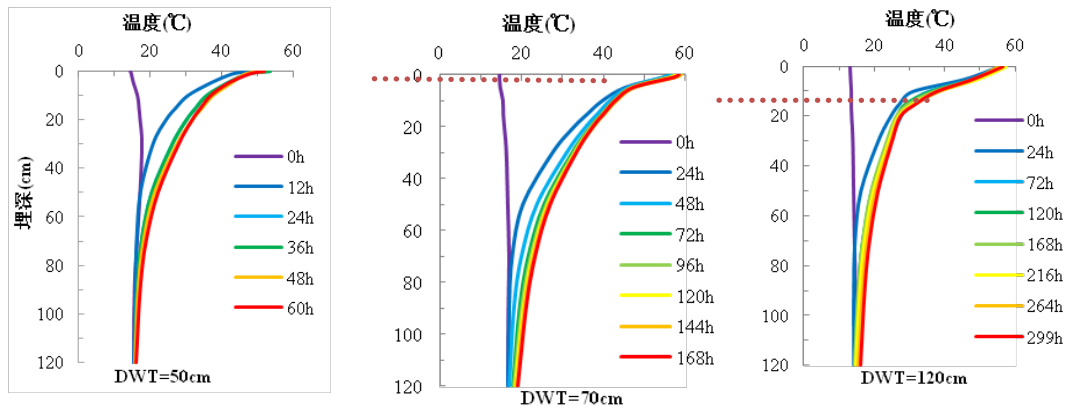


图 3 不同水位埋深下温度变化曲线 (红色点线为干沙层底边界; 纵轴为土壤剖面深度, 地表为 0cm, 正方向向下, 下同)

Figure 3 The temperature variation curves in different depths of the water table(the dotted red line indicates the bottom boundary of DSL; Vertical axis means soil profile depths, the surface is 0cm, positive direction is down, same below)

.....

3 讨论

本研究发现土壤剖面各物理量与干沙层关系密切，温度、含水率、基质势、水汽密度曲线均在干沙层底边界突变，这与前人的研究一致^[8,12]，在室内试验数据分析基础上，提出宜选用基质势作为准确判断干沙层底界的指标。Shokri N、Yamanaka 等人对干沙层的形成过程进行了分析^[5,6,8]，表明液态水只能运移至干沙层底部，且发现干沙层底部存在液态水汽化的窄区域，在该区域内主要水分运移方式由液态水向汽态水过渡^[8]。本次研究发现过渡带位于干沙层底边界及水汽运移零通量面之间，厚度约 5cm，过渡带以下区域水汽通量很小，水分运移以液态水运移为主；而过渡带内液态水大量汽化，水汽运移在强烈向上的基质势梯度作用下占据主导地位。

.....

4 结论

基于室内物理试验综合分析，可获得以下结论：

- (1)
- (2)
- (3)
- (4)

参考文献

- [1] 李文莉.干表层影响下浅层包气带水汽热耦合运移研究[D].西安:长安大学,2014.
- [2] 刘宇峰,杜忠潮,原志华,等.近 60a 毛乌素沙地东缘主要气候要素的多时间尺度变化特征[J].干旱区资源与环境,2016,30(9): 121-127.
- [3] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社.2006:126-199.

.....

Characteristics of dry surface layer formation and the resistance to the transfer of vapor in soil profile under almost stable radiant intensity

LI Wenli^{1,2,3}, YANG Zeyuan^{2,4,5}, FAN Limin^{1,3}, SHI Xiaoqiong⁶, ZHANG Yanna²

(1. Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710054; 2. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054; 3. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Xi'an 710054; 4. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an 710054; 5. The Research Center of Groundwater and Ecological Environment Engineering in Shaanxi Province, Xi'an 710054; 6. 203 Research Institute of China National Nuclear Corporation, Xi'an 710054, China)

Abstract: Dry surface layer is an important and widespread phenomenon on the interface between soil and atmosphere in the arid and semi-arid regions. DSL drives the circulation of surface water and groundwater, and affects evaporation and vegetation growth. In this research, the aeolian sand in Mu Us sandy land was applied as the research object, by the means of the indoor physical experiment, under almost stable radiant intensity, the temperature, water content, relative humidity and matric potential were observed in different depths, and the max depth of DSL in different groundwater levels was measured. The results show that a sharp change is found in the parameters profiles. And the transition zone of water and vapor transport which is about 5cm is formed under the bottom boundary of the DSL. The quantitative interrelation of the surface aerodynamic resistance r_a , and the resistance to the transfer of vapor in the DSL r_d with the thickness of DSL Z_d were analyzed in order to study the inhibiting effect of soil drying on evaporation. The conclusion is that the r_a decreases and r_d increases, respectively with the thickness of DSL increasing. (i) $Z_d \leq 20\text{mm}$, the evaporation is mainly limited by r_a , (ii) $Z_d > 20\text{mm}$, the evaporation is mainly limited by r_d , (iii) $Z_d > 100\text{mm}$, r_a has little impact on evaporation, which could be negligible.

Key words: dry sand layer (DSL); sharp change; transition zone; the resistance to the transfer of vapor; Mu Us sandy land

联系人: XXX

联系电话: XXXXXX

联系地址: XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX