

# 库尔勒地区不同下垫面潜水蒸发昼夜变化特性研究

邢旭光<sup>1</sup>, 史文娟<sup>1\*</sup>, 徐 飞<sup>1</sup>, 王全九<sup>1,2</sup>, 赵 勋<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 为研究新疆地区的潜水蒸发特性, 开展了裸地(埋深 1.0 m、1.5 m 和 2.0 m)、覆膜无作物(开孔率 0.78%、2.4% 和 5.0%)以及种植棉花(埋深 1.0 m、1.5 m 和 2.0 m)等三种下垫面条件的潜水蒸发试验, 分别研究了昼夜、日间及夜间变化动态。研究表明, 有作物比无作物潜水蒸发系数大, 且随埋深的增加, 两者潜水蒸发系数差异性减弱; 三种下垫面条件共 9 种处理均表现为潜水夜间蒸发补给量大于白天蒸发补给量, 且地下水埋深越大, 裸地夜间潜水消耗与白天潜水消耗的比值有所降低, 棉花地则是呈增加趋势, 这与棉花蒸腾强度的昼夜变化不同有关。进一步分析表明, 无作物种植时, 潜水蒸发的日变化波动幅度较大, 潜水蒸发主要消耗时段为 2:00~10:00 和 18:00~22:00; 有作物种植时, 潜水蒸发的日变化较为稳定, 其无明显主要消耗时段, 只是在昼夜交替时(20:00 左右)发生较大幅度变化; 白天尤其是午后, 因强烈的太阳辐射使得土壤输水能力不能满足大气蒸发需求而导致毛管断裂, 潜水蒸发量明显降低, 平均降低  $0.66 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 夜间土壤的输水能力大于蒸发能力而使毛管恢复连通, 从而促使潜水蒸发有所增强, 平均增加  $0.26 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

**关键词:** 潜水蒸发; 昼夜变化特性; 下垫面; 覆膜开孔率; 棉花

**中图分类号:** S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)03-0083-07

## Diurnal variation characteristics of groundwater evaporation with different underlying surfaces in Korla

XING Xu-guang<sup>1</sup>, SHI Wen-juan<sup>1\*</sup>, XU Fei<sup>1</sup>, WANG Quan-jiu<sup>1,2</sup>, ZHAO Xun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Northwest Water Resources and Ecological Environment of Ministry of Education,

Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In attempt to study diurnal variation characteristics of groundwater evaporation with different underlying surfaces in Korla area, three kinds of underlying surfaces, bare soil (buried depths are 1.0 m, 1.5 m and 2.0 m), film mulching without crop (open hole ratios are 0.78%, 2.4% and 5.0%) and cotton (buried depths are 1.0 m, 1.5 m and 2.0 m), were tested in this paper. The results showed that groundwater evaporation coefficient with crop was higher than that without crop, and difference between them decreased gradually with increase of buried depth. All the test results indicated that groundwater evaporation was higher in nighttime than in daytime. The ratio of bare soil groundwater consumption between nighttime and daytime was reduced, but ratio for cotton was increased with increase of groundwater depth, which may have nothing to do with difference of diurnal variations of cotton transpiration intensity. Further study showed that without crop planted, diurnal variations range of groundwater evaporation was bigger, and major groundwater consumption periods were 8:00~10:00, 18:00~22:00 and 2:00~6:00; however, groundwater evaporation intensity for treatments with crop planted was stable and had no obvious consumption periods. It only had a significant change at

收稿日期: 2013-01-16

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技计划课题“新疆绿洲灌区节水关键技术和用水安全研究与示范”(201130103-3); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(S2012JC7610); 陕西省教育厅基金(11JS076)

作者简介: 邢旭光(1986—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要从事农业水资源方面的研究。E-mail: xg\_xing@yeah.net。

\* 通信作者: 史文娟(1972—), 女, 陕西武功人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail: shiwj@xaut.edu.cn。

about 20:00. Daily variation of groundwater evaporation showed more obvious fluctuation in the treatment without crop planted than in the treatment with crop planted. During daytime, especially in the afternoon, groundwater evaporation intensity was significantly reduced (by  $0.66 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ), which was caused by less of water transport rate in soil than atmospheric evaporation capacity. In nighttime, groundwater evaporation intensity was increased by  $0.26 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , which was mainly due to the fact that water transport rate in soil was bigger than the atmospheric evaporation capacity.

**Keywords:** groundwater evaporation; diurnal variation characteristic; underlying surface; open hole ratio; cotton

潜水蒸发是田间水循环的重要组成部分,是干旱地区地下水的主要消耗项,同时也是土壤盐分累积的主要动力<sup>[1]</sup>。土壤盐渍化的重要机制是地下水和深层土壤中可溶性盐在蒸发作用下不断向土表聚集<sup>[2]</sup>。新疆地区降雨稀少而蒸发强烈,在蒸发作用下将引发土壤次生盐碱化问题,特别是农田地下水浅埋区,盐渍化现象更为严重,从而影响农田生态环境及绿洲农业稳定。覆膜灌溉技术以其节水、抑盐等优势在新疆地区得以迅速发展和推广应用<sup>[3]</sup>。对于裸土、土表覆膜种植和不覆膜种植等下垫面条件而言,其潜水蒸发特征均存在差异,因此,研究其潜水蒸发特性对指导农田灌溉、调控地下水位和天然植被生态耗水量计算等均具有重要作用<sup>[4]</sup>。

许多学者在潜水蒸发试验方法<sup>[5-6]</sup>、影响因素<sup>[7-8]</sup>和计算模型<sup>[9-10]</sup>等方面做了大量研究;同时,在潜水蒸发年际变化和年内变化等方面研究较多:如付秋萍<sup>[11]</sup>利用 5 年潜水蒸发资料对潜水蒸发经验公式中  $E_0$  的取值进行了探讨;郝振纯<sup>[12]</sup>利用多年潜水蒸发资料分析了不同土质与埋深的关系,同时研究了不同季节对潜水蒸发量的贡献率;史文娟<sup>[13-14]</sup>通过室内试验,分析了 30 d 的不同条件下潜水蒸发特征;王振龙<sup>[1]</sup>通过逐日和逐旬观测资料研究分析了有无作物条件下的潜水蒸发规律;胡顺军<sup>[15]</sup>利用多年平均蒸发量及水面蒸发量资料对潜水蒸发规律进行了分析并建立了模型。纵观有关潜水蒸发的研究成果,大都是从潜水日变化特征(即每日 8:00~翌日 8:00 共计 24 h)、年内变化及年际变化特征等方面来揭示潜水蒸发的变化规律,较少涉及到不同条件下的潜水蒸发的昼夜变化特性,这样不利于揭示潜水蒸发的内在变化特征及机理。基于新疆地区特殊的地理和气候条件,本文拟通过地下水均衡场,在潜水蒸发日变化特征研究的基础上,将白天和夜晚分开,重点研究和分析前述不同下垫面条件下(裸土、覆膜无作物和种植棉花)的潜水蒸发昼夜变化特征、差异及其原因。旨在深入研究潜水蒸发机理,为明晰土壤水盐运移规律以及制定最佳

灌溉制度提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验站概况

潜水蒸发试验在新疆维吾尔自治区塔里木河流域巴音郭楞管理局水利科研所(北纬  $41^{\circ}36'$ , 东经  $86^{\circ}12'$ )地下水均衡场进行,试验站位于天山南麓塔里木盆地边缘孔雀河冲积平原带,属暖温带大陆性荒漠气候。该地区干旱少雨而蒸发强烈,气候干燥,昼夜温差大。多年平均降雨量  $53.3 \sim 62.7 \text{ mm}$ ,潜在蒸发量  $2\,273 \sim 2\,788 \text{ mm}$ ,蒸降比达 43.6,日照时数  $3\,036.2 \text{ h}$ ,年平均气温  $11.48^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温  $4\,121.2^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 191 d。

### 1.2 试验设计

利用地下水均衡场非称重式蒸渗仪开展裸土、覆膜无作物和不覆膜有作物等三种下垫面条件的潜水蒸发试验,并以  $\Phi = 20 \text{ cm}$  蒸发皿水面蒸发量 ( $E_{\Phi 20}$ )表征大气蒸发能力。具体实施方案如表 1 所示,并设计了 A、B、C 三个方案(共 9 个处理,每个处理 2 个重复)。方案 C 为裸土种植棉花(新陆中 40),其株距 10 cm,行距 50 cm,两行种植,每种处理共 10 株。依据库尔勒地区实际地下水埋深(1.0~2.5 m)的实际情况,设置了三种地下水埋深,即 1.0 m、1.5 m 和 2.0 m(见表 1)。

蒸渗仪是研究包气带水、热及溶质运移的重要工具<sup>[16]</sup>。本研究所用非称重式蒸渗仪主要由土体、供水系统及附带装置组成,土体底部铺有 30 cm 砂砾反滤层,顶部与地面齐平。供水系统主要由改进的马氏瓶组成以模拟恒定的地下水位。同时,为深入研究潜水蒸发机理,排除矿化度对潜水蒸发的影响<sup>[17]</sup>,供水水源取当地渠道水,其矿化度为  $0.74 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,可视为淡水。

实验所用土质均为当地的粉砂壤土。土样经风干、碾压、去杂,过 2 mm 孔径标准筛并混合均匀,参考天然状态土体容重,按设定容重  $1.75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  均匀装填。土壤机械组成见表 2,土壤初始化学性质及离子组成见表 3。

表 1 潜水蒸发试验方案  
Table 1 Experiment schemes of groundwater evaporation

| 方案<br>Schemes | 处理<br>Treatments | 地下水埋深/m<br>Groundwater table | 下垫面条件<br>Underlying surfaces             | 供试地下水矿化度<br>Salinity of groundwater<br>/(g·L <sup>-1</sup> ) |
|---------------|------------------|------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| A             | 1                | 1.0                          | 裸土无作物<br>Soil without plant or mulch     | 0.74                                                         |
|               | 2                | 1.5                          |                                          |                                                              |
|               | 3                | 2.0                          |                                          |                                                              |
| B             | 4                | 1.5                          | 覆膜无作物<br>Soil with no<br>plant but mulch | 0.74                                                         |
|               | 5                |                              | 开孔率 0.78% Open hole ratio is 0.78%       |                                                              |
|               | 6                |                              | 开孔率 2.4% Open hole ratio is 2.4%         |                                                              |
| C             | 7                | 1.0                          | 裸土有作物(棉花)<br>Soil with plant(Cotton)     | 0.74                                                         |
|               | 8                | 1.5                          |                                          |                                                              |
|               | 9                | 2.0                          |                                          |                                                              |

表 2 供试土壤的颗粒组成  
Table 2 Particle size of the selected soil

| 土壤类型<br>Soil type | 不同粒径土壤颗粒含量/%<br>Soil particle content of different grain diameter |                |           |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------|-----------|
| 粉砂壤土<br>Silt loam | 0.05 ~ 1mm                                                        | 0.001 ~ 0.05mm | < 0.001mm |
|                   | 36.779                                                            | 59.959         | 3.262     |

表 3 土壤初始化学性质及离子组成  
Table 3 Chemical characteristics and ion composing of soil

| 电导率<br>Electrical<br>conductivity<br>/(mS·cm <sup>-1</sup> ) | 离子浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )<br>Ion concentration |                 |                              |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------|------------------------------|
|                                                              | Na <sup>+</sup>                                 | Cl <sup>-</sup> | 盐土分类<br>Salt type            |
| 14.39                                                        | 372.46                                          | 2701.45         | Cl - Na 型<br>Type of Cl - Na |

1.3 测定项目及方法

每年的 7—8 月份为库尔勒地区典型蒸发时段, 高温、气候干燥且蒸发强烈, 因此对于夏季而言具有一定代表性, 故试验主要在 7—8 月份进行(方案 A、C 为 2012 - 07 - 10 至 2012 - 08 - 31, 方案 B 为 2012 - 07 - 29 至 2012 - 08 - 31)。蒸发过程中每日 8:00 和 20:00 观测马氏瓶水量变化以明确逐日昼、夜潜水蒸发量的连续变化动态(精确到 0.1 mm), 同时观测  $\Phi = 20$  cm 蒸发皿水面蒸发量。为明确潜水蒸发日变化特征及潜水主要消耗时段, 在试验期间选取天气晴朗的 07 - 12、07 - 23、07 - 31、08 - 07、08 - 15、08 - 24 和 08 - 28 共计 7 日对潜水蒸发量变化进行加密观测, 观测时段为 8:00 ~ 翌日 8:00, 期间每隔 2h 观测 1 次。本研究中, 设定当日 8:00 ~ 20:00 时为昼、20:00 ~ 翌日 8:00 时为夜。

为使潜水蒸发研究成果更具有普适性, 文中采用潜水蒸发系数( $\epsilon$ )替代潜水蒸发强度, 即:

$$\epsilon = E/E_0$$

式中,  $E$  为潜水蒸发强度(mm·d<sup>-1</sup>);  $E_0$  为相应时段内的水面蒸发强度(mm·d<sup>-1</sup>)。

2 结果与分析

2.1 不同处理潜水蒸发系数变化趋势特征分析

图 1 显示了库尔勒地区 7—8 月份不同地下水埋深各处理潜水蒸发系数(即每日 8:00 ~ 翌日 8:00 共计 24 h 平均潜水日蒸发强度)的连续变化动态。

由图 1 可知, 无论有无作物, 潜水蒸发均出现不同程度的波动, 且种植棉花的处理变化幅度更大。这与每日气象条件不同以及棉花生长加剧了水分的消耗有关; 对比图 1(a)和(b)、(c)不难发现, 埋深 1.0 m 的裸地和棉花地在蒸发后期潜水蒸发系数都有所下降, 埋深 1.5 m 的三种处理潜水蒸发系数相对稳定, 而埋深 2.0 m 的不同处理在后期均有所增加, 分析其原因认为, 与盐分累积与土表反过来又抑制了水分的蒸发有关<sup>[18]</sup>, 即埋深较浅时, 潜水蒸发系数较大, 因此很快在土表形成一层盐壳(在试验过程中能明显看到), 而盐壳反过来又在一定程度上抑制了水分的蒸发, 且土表含盐量越大, 抑制水分的程度越大, 因此表现为地下水埋深越浅, 潜水蒸发系数减小的趋势越明显。

此外, 对比图 1 的(a)、(b)和(c)还可以看出, 三种埋深条件下, 有作物种植时潜水蒸发系数均远远大于无作物条件, 这与王振龙<sup>[1]</sup>、胡顺军<sup>[15]</sup>、孟伟超<sup>[19]</sup>等人的研究结果一致, 说明土表形态对潜水蒸发强度影响显著。对于作物地而言, 作物改变了土壤水分的耗散形式, 由于作物根系发育和叶面积增长, 加之气温较高, 作物蒸腾量加大, 根系对地下水吸收量也随之增加。对于无作物地, 土表不同覆膜

开孔程度亦影响潜水蒸发量,即不同土表形态的潜水蒸发特性不同,由此亦可知,棉花不同种植模式将影响潜水蒸发量,进而影响地下水对作物根系的补

给量,从而影响棉花长势。不同埋深条件下裸地和棉花地的潜水蒸发系数大小及波动幅度整体均表现为 1.0 m>1.5 m>2.0 m。

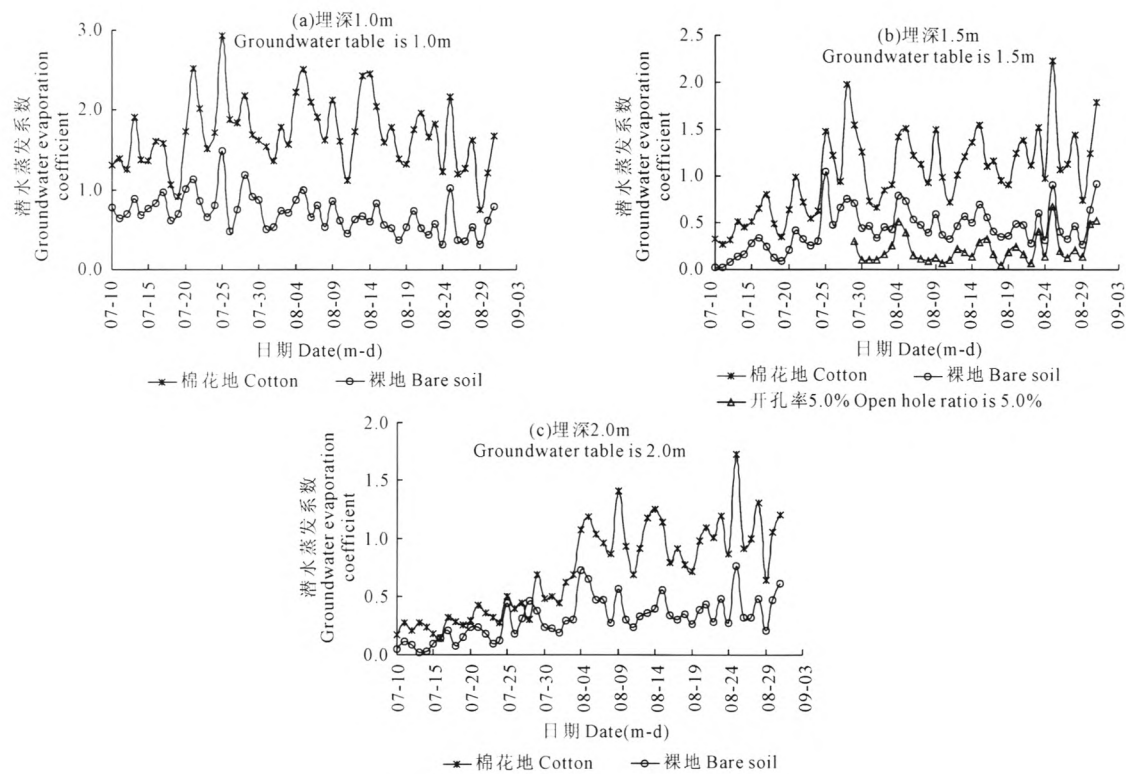


图 1 不同下垫面条件单位面积潜水蒸发系数对比

Fig.1 Comparison of groundwater evaporation coefficient of different underlying surface conditions per unit area

2.2 不同处理潜水蒸发系数日间变化特性分析

鉴于新疆地区日照时间长且温度高,其潜水蒸发量也较大,因此对该地区潜水日间变化进行分析。潜水日间变化是指每日 8:00~20:00 共计 12 h 的潜

水蒸发变化特征。图 2(a、b)为有无作物条件日间潜水蒸发变化,以处理 1~3 以及 7~9(分别为方案 A、C)为例。

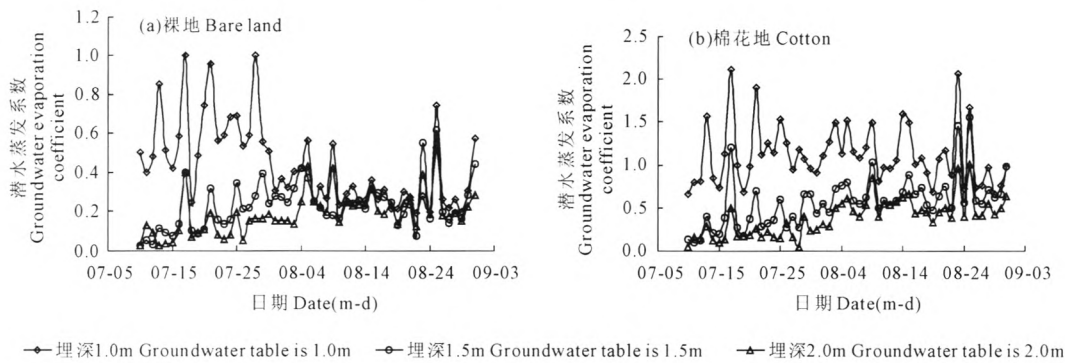


图 2 不同埋深裸地与棉花地单位面积日间潜水蒸发系数变化

Fig.2 Change of groundwater evaporation coefficient between bare soil and cotton of different depths per unit area in day-time

从图 2 可以看出,潜水日间蒸发特性与潜水日蒸发特性(图 1)有较明显区别。埋深分别为 1.0 m、1.5 m 和 2.0 m 的裸地单位面积上潜水日间平均潜水蒸发系数均依次减小,分别为 0.439、0.228 和 0.189;棉花地分别为 1.113、0.572 和 0.388,虽亦呈

递减趋势,但均高于裸地的潜水蒸发系数。由于棉花根系吸水作用以及盐分累积的影响,导致埋深为 1.0 m 两个处理差异尤为显著。

图 2(a)、(b)中无论是否种植作物,潜水蒸发系数变化动态均有不同程度波动,这是由于气象因素

变化而引起的潜水蒸发以及水面蒸发不稳定所致。图 2(a)显示,裸土埋深 1.0 m 的处理潜水日间蒸发系数分别在 07-17 和 07-27 发生两次较大幅度的波动;埋深 1.5 m 的处理潜水日间蒸发系数分别在 07-29 和 08-24 发生两次较大幅度的波动;埋深 2.0 m 的处理潜水日间蒸发系数只在 08-05 发生较大幅度的波动。图 2(b)显示,棉花地埋深为 1.0 m 时,潜水蒸发系数分别在 07-19、07-29 和 08-15 三日发生较大幅度波动,对于埋深为 1.5 m 和 2.0 m

而言,其日间潜水蒸发系数较稳定,只于 07-29 发生大幅变化。

2.3 不同处理日间和夜间潜水蒸发特征分析

在对潜水蒸发昼夜差异进行分析时,选用“极差”(即总体各单位的标志值,最大标志值与最小标志值之差)和“偏离潜水蒸发量均值幅度”来显示潜水蒸发量的离散程度和变化幅度,并间接表示监测期间潜水蒸发量的稳定程度。各项指标值见表 4。

表 4 不同下垫面条件单位面积潜水蒸发昼夜变化/mm  
Table 4 The diurnal variations of groundwater evaporation with different underlying surface conditions per unit area

| 处理<br>Treatments | 控制变量<br>Control<br>variables | 平均潜水<br>蒸发补给量<br>Average groundwater<br>supplement | 潜水蒸发<br>补给量极差<br>Range of groundwater<br>supplement | 最大偏离均值幅度<br>Maximal amplitude<br>deviating from<br>the mean value | 平均偏离均值幅度<br>Average amplitude<br>deviating from<br>the mean value |
|------------------|------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 1~3              | 1.0 m                        | 昼 Day                                              | 2.81                                                | 3.64                                                              | 2.39                                                              |
|                  |                              | 夜 Night                                            | 4.44                                                | 6.76                                                              | 3.88                                                              |
|                  | 1.5 m                        | 昼 Day                                              | 1.44                                                | 2.86                                                              | 1.68                                                              |
|                  |                              | 夜 Night                                            | 2.04                                                | 4.16                                                              | 2.22                                                              |
|                  | 2.0 m                        | 昼 Day                                              | 1.19                                                | 2.28                                                              | 1.22                                                              |
|                  |                              | 夜 Night                                            | 1.70                                                | 5.20                                                              | 3.50                                                              |
| 4~6              | 0.78%                        | 昼 Day                                              | 0.40                                                | 1.33                                                              | 1.00                                                              |
|                  |                              | 夜 Night                                            | 0.54                                                | 1.94                                                              | 1.42                                                              |
|                  | 2.4%                         | 昼 Day                                              | 0.52                                                | 1.40                                                              | 0.95                                                              |
|                  |                              | 夜 Night                                            | 0.85                                                | 3.00                                                              | 2.18                                                              |
|                  | 5.0%                         | 昼 Day                                              | 0.67                                                | 1.47                                                              | 1.06                                                              |
|                  |                              | 夜 Night                                            | 1.14                                                | 3.56                                                              | 2.56                                                              |
| 7~9              | 1.0 m                        | 昼 Day                                              | 7.14                                                | 4.47                                                              | 2.00                                                              |
|                  |                              | 夜 Night                                            | 8.42                                                | 7.13                                                              | 3.82                                                              |
|                  | 1.5 m                        | 昼 Day                                              | 3.60                                                | 4.94                                                              | 2.82                                                              |
|                  |                              | 夜 Night                                            | 4.63                                                | 7.06                                                              | 4.25                                                              |
|                  | 2.0 m                        | 昼 Day                                              | 2.47                                                | 4.42                                                              | 2.21                                                              |
|                  |                              | 夜 Night                                            | 3.33                                                | 6.16                                                              | 3.35                                                              |

注:“控制变量”依次为埋深、覆膜开孔率和埋深;“平均潜水蒸发补给量”指整个试验期间的潜水蒸发补给量平均值;“最大偏离均值幅度”某日潜水蒸发补给量与平均潜水蒸发补给量的最大差值;“平均偏离均值幅度”指每天潜水蒸发补给量与平均潜水蒸发补给量差值的平均值。

Note: The control variables were depth, open hole ratio and depth, respectively. The index of “Average groundwater supplement” was defined as the average value of groundwater supplement during the experiment. The index of “Maximal amplitude deviating from the mean value” was defined as the maximum difference between groundwater supplement on someday and average groundwater supplement. The index of “Average amplitude deviating from the mean value” was defined as the average value of groundwater supplement on everyday and average groundwater supplement.

从表 4 可以看出,各处理的潜水昼夜平均补给量、补给量极差和平均偏离均值幅度均表现为夜间大于白天,说明夜间潜水补给量的变化幅度大于白天,而且对气象条件变化的敏感度略高,这点亦可以从潜水昼夜蒸发量的最大偏离均值幅度和平均偏离均值幅度看出。从各处理的平均补给量可以看出,潜水夜间补给量均大于白天,由此可以推断库尔勒地区夏季的潜水蒸发主要在夜间进行,且占全天蒸发量较大比例:对裸土而言,埋深 1.0 m、1.5 m 和 2.0 m 潜水夜间蒸发量分别占全天蒸发量的

61.24%、58.56% 和 58.83%;对土表覆膜不同开孔程度而言,开孔率 0.78%、2.4% 和 5.0% 潜水夜间蒸发量分别占全天蒸发量的 50.31%、62.29% 和 62.94%;对种植棉花而言,埋深 1.0 m、1.5 m 和 2.0 m 潜水夜间蒸发量分别占全天蒸发量的 54.11%、56.27% 和 57.39%,这可能与棉花蒸腾强度的昼夜变化不同有关。

2.4 不同处理潜水蒸发强度日变化动态比较

为进一步明确昼夜间潜水蒸发的主要消耗时段,分析了各处理的潜水蒸发日变化特征,见图 3(a

~ e)。由于各处理潜水蒸发日变化趋势相似,只是数值上存在差异,因此,选取处理 1、3、6、7 和 9 的其中 3 天进行分析。

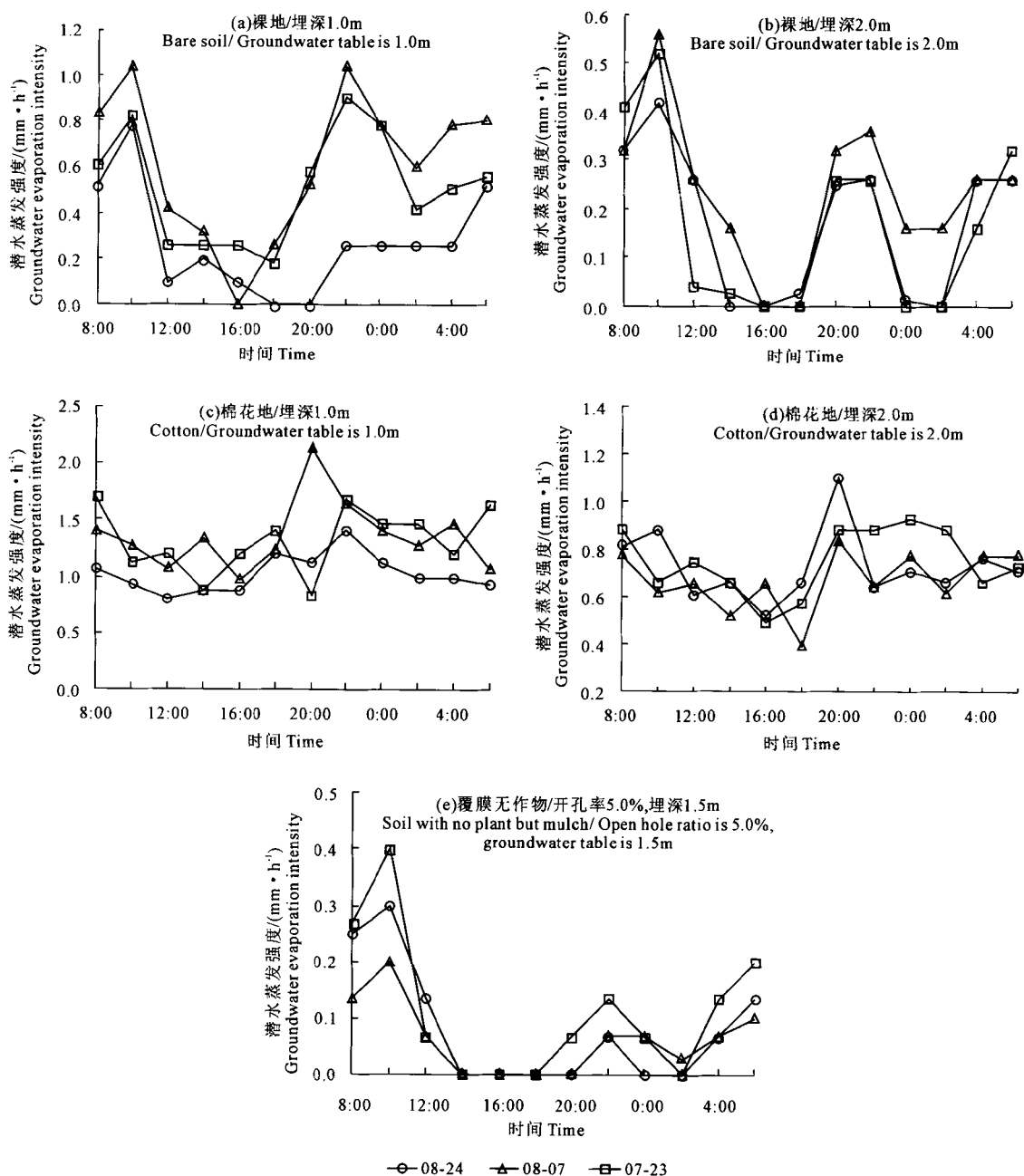


图 3 不同下垫面条件单位面积潜水蒸发强度日变化

Fig.3 Daily variations of groundwater evaporation intensity with different underlying surface conditions per unit area

图 3 显示了潜水蒸发日变化动态。对裸地而言,整体表现出 2:00 ~ 10:00 和 18:00 ~ 22:00 为潜水进行蒸发的主要时间段,蒸发量较大,12:00 ~ 16:00 正值高温,潜水蒸发量并未增大反而减小,印证了上述结论。对于土表覆膜情况,潜水蒸发主要进行时段与裸地相同,不同的是在 14:00 ~ 18:00 期间,潜水蒸发量接近于零,这主要与覆膜增加了地温,导致土表过于干燥所致。当种植棉花时,并未出现蒸发主要消耗时段,只是在昼夜交替时(20:00 左

右)发生变化,原因在于除土面蒸发外,根系吸水促使潜水向上运移。

### 3 讨论

根据本研究结果,实验区夏季“潜水蒸发量夜间大于白天”,这与栗现文<sup>[20]</sup>、侯莉莉<sup>[21]</sup>和夏自强<sup>[22]</sup>等人的研究结果相同,但前人的研究成果仅是基于下垫面为裸地情况所得。本文 3 种试验方案共 9 种不同类型处理的潜水蒸发量均表现出夜间大于白

天,进一步证明了结论的正确性,同时说明覆膜和种植作物等下垫面条件潜水蒸发亦具有此种特性,也反映出库尔勒地区的潜水蒸发有其特殊性。究其原因,主要存在以下几方面:其一,潜水对土壤水的补给需要一定的时间,因此相对于大气蒸发能力的变化出现一定程度的延迟;其二,白天 12:00 以后,太阳辐射明显增强,土壤的输水能力远远小于大气的蒸发能力,表层土壤含水量明显降低,致使毛细管断裂,水分汽化的蒸发面下移,从而明显地抑制了潜水的蒸发<sup>[3]</sup>。下午 18:00 以后,一方面,太阳辐射强度降低,土壤表层的水分消耗减小,土壤的输水能力开始大于大气的蒸发能力,土壤表层含水量增加,毛管水流开始变得通畅,水分汽化又开始在土壤表面进行;其三,在夜晚,液态水运移是由于冷端(地表)温度降低,使土壤水和空气界面上的表面张力增加,因而土壤水吸力增强,土水势降低,从而导致土壤中非饱和水从吸力低处流向吸力高处,即从暖端流向冷端(从地下向地表运移)。从上述几方面可知,蒸发不是只发生在温度较高的白天,相反,夜间的蒸发强度比白天大得多<sup>[21]</sup>。尽管在 0:00~2:00 左右因气温的降低潜水蒸发有所降低,但随着此后温度的再次回升,潜水蒸发消耗也开始增加,直到白天的 12:00 左右。这种情况在裸地和覆膜土壤方面都表现得十分明显(图 3a, b, e)。对于棉花地而言,由于棉花的覆盖作用,其土壤蒸发明显减小,土壤毛管处于连通状态,因此没有出现白天 12:00 潜水蒸发明显下降的情况,整个日变化过程中潜水蒸发相对较为稳定。

## 4 结 论

通过研究库尔勒地区水面蒸发量和裸土、土表覆膜不同开孔率以及种植作物条件下的潜水蒸发变化规律,得到以下主要结论:

(1) 土表形态对潜水蒸发强度影响显著。种植作物时,潜水蒸发系数明显大于裸地。随着埋深的增加,有无作物条件下潜水蒸发系数差异减弱。

(2) 裸土、土表覆膜不同开孔率以及种植作物条件下的潜水蒸发均表现出夜间蒸发较白天蒸发剧烈。在潜水平均日蒸发量中,其夜间蒸发量所占比例较大;且对于裸土来说,地下水埋深越大,夜间潜水消耗与白天潜水消耗的比值越小,而对于棉花地而言,地下水埋深越大,夜间潜水消耗与白天潜水消耗的比值越大。

(3) 无作物条件潜水蒸发主要消耗时段为 2:00~10:00 和 18:00~22:00,有作物条件由于根系吸

水,蒸发过程无明显的主要消耗时段,只是在昼夜交替时(20:00 左右)发生较大幅度变化,这对于确定适宜的灌水时间具有重要意义。

## 参 考 文 献:

- [1] 王振龙,刘 森,李 瑞. 淮北平原有无作物生长条件下潜水蒸发规律试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 26-32.
- [2] 史文娟,汪志荣,沈 冰. 夹砂层土壤水盐运移实验研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- [3] 张德奇,廖允成,贾志宽. 旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 208-213.
- [4] 王春霞,王全九,庄 亮,等. 干旱区膜下滴灌条件下膜孔蒸发特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 14-21.
- [5] Meissner R, Rupp H, Seyfarth M. Advances in out door lysimeter techniques[J]. Water Air Soil Pollute: Focus, 2008, 8: 217-225.
- [6] Unold G V, Fank J. Modular design of field lysimeters for specific application needs[J]. Water Air Soil Pollute: Focus, 2008, 8: 233-242.
- [7] 周金龙,董新光,王 斌. 新疆平原区潜水蒸发研究[J]. 工程勘察, 2003, (5): 23-27.
- [8] 樊自立,马英杰,张 宏,等. 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 8-13.
- [9] Lautz L K. Estimating groundwater evapotranspiration rates using diurnal water-table fluctuations in a semi-arid riparian zone[J]. Hydrogeology Journal, 2008, (16): 483-497.
- [10] Lhomme J P, Guilioni L. On the link between potential evaporation and regional evaporation from a CBL perspective[J]. Theor Appl Climatol, 2010, 101: 143-147.
- [11] 付秋萍,张江辉,王全九.  $E_0$  值对潜水蒸发计算精度影响分析[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6): 820-825.
- [12] 郝振纯,陈 玺,王加虎,等. 淮北平原裸土潜水蒸发趋势及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 73-78.
- [13] 史文娟,沈 冰,汪志荣,等. 高地下水位条件下盐渍土区潜水蒸发特性及计算方法[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 32-35.
- [14] 史文娟,沈 冰,汪志荣,等. 夹砂层状土壤潜水蒸发特性及计算模型[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 17-20.
- [15] 胡顺军,康绍忠,宋郁东,等. 塔里木盆地潜水蒸发规律与计算方法研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 49-53.
- [16] 乔东梅,齐学斌,庞鸿滨,等. 地下水作用下微咸水灌溉对土壤及作物的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 55-61.
- [17] 栗现文,周金龙,赵玉杰,等. 高矿度对砂性土毛细水上升影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 84-89.
- [18] 张振华,史文娟,褚桂红. 干旱区潜水蒸发的影响因素和计算方法分析[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(6): 78-80.
- [19] 孟伟超,孟 翀,刘 磊. 不同地下水埋深、气象因子及作物影响的潜水蒸发模型研究[J]. 太原理工大学学报, 2008, 39(4): 422-425.
- [20] 栗现文,周金龙,靳孟贵,等. 干旱区高盐度潜水蒸发试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5): 6-10.
- [21] 侯莉莉. 蒸发条件下包气带水热运移模拟研究[D]. 西安:长安大学, 2009.
- [22] 夏自强,郭必芳,蒋洪庚,等. 温度变化对土壤水运动及土壤水与潜水分交换的影响[J]. 水科学进展, 1995, 6(增刊): 15-22.