

基于蒸渗仪和解析法估算毛乌素沙地潜水蒸发量

王文科, 尹红美, 黄金廷, 李俊亭

Estimation of groundwater evaporation based on lysimeter experiment and analytical solution in the Mu Us sandy land

WANG Wenke, YIN Hongmei, HUANG Jinting, and LI Juntong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海原盆地地下水咸化特征和控制因素

Groundwater salinization characteristics and controlling factors in the Haiyuan Basin

王雨山, 李戌, 李海学, 程旭学, 刘伟坡, 张梦南 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 10-17

基于野外观测与能量守恒原理分析饱和裸土与水面蒸发量的差异

Evaporation between saturated bare soil and water an analysis based on field observations and energy balance consideration

李婉歆, 尹红美, 王文科, 卢艳莹, 王艺柯 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 38-44

半干旱地区地表-地下水系统水热运移与裸土蒸发研究

Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas

马稚桐, 王文科, 赵明, 黄金廷, 卢艳莹, 侯昕悦, 王一 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 7-14

巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究

Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China

周燕怡, 王旭升 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 44-54

赣江新干航电枢纽左库岸地下水浸没控制效果研究

Research on the control effects of groundwater immersion on the left reservoir bank of Xingan Navigation and Power Junction in Ganjiang River

张宇, 任国澄, 杨蕴, 周志芳, 郭生根, 熊鸿强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 147-155

基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究

Evolutional processes of groundwater in Xinglong County based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes

杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 李志明, 刘文波, 康伟 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 154-162



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012027

基于蒸渗仪和解析法估算毛乌素沙地潜水蒸发量

王文科¹, 尹红美², 黄金廷³, 李俊亭¹

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质环境
调查院, 河南 郑州 450045; 3. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 地下水蒸发是旱区地下水均衡计算中重要的排泄项之一。由于包气带水分运移高度非线性且大气—地表界面动力学过程复杂, 估算潜水蒸发量一直是地下水资源评价的难题之一。利用内蒙古乌审旗河南乡均衡试验场 E601 型蒸渗仪, 建立了毛乌素沙地水面蒸发及 4 种典型岩性(风化砂岩 K_1 、萨拉乌苏组砂 Qp^{at+1} 、砂质壤土 Qh^l 、风积沙 Qh^{eol}) 的饱和土蒸发原位试验, 结合长期观测获取的大量数据, 开展了地下水蒸发与水面蒸发、埋深的关系和地下水蒸发量计算方法研究。结果表明: (1) 4 种典型岩性(风化砂岩、萨拉乌苏组砂、砂质壤土、风积沙)饱和蒸发量与水面蒸发量比值分别为 0.60, 0.77, 0.47, 0.88, 表明不同岩性的饱和裸土的蒸发强度不等于自由水面的蒸发强度; 实际计算裸土蒸发强度时, 不能以自由水面蒸发强度作为参考点, 如果运用, 必须校正。(2) 利用蒸渗仪观测数据和土壤水运动方程稳态解析解, 获得 4 种典型岩性(风化砂岩、萨拉乌苏组砂、砂质壤土、风积沙)潜水稳定蒸发计算的关键经验系数 c , 分别为 628 932.63, 165 058.71, 48 948.21, 1 525 104.031 m^2 。(3) 利用稳定蒸发公式确定鄂尔多斯盆地风沙滩区四种典型包气带岩性(风化砂岩、萨拉乌苏组砂、砂质壤土、风积沙)潜水极限蒸发深度约为 60 cm, 结果得到了室内非稳态蒸发试验的佐证, 为研究区水资源评价提供了重要的参数依据。

关键词: 蒸发; 地下水; 蒸渗仪; 解析法; 毛乌素沙地

中图分类号: P641.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0001-06

Estimation of groundwater evaporation based on lysimeter experiment and analytical solution in the Mu Us sandy land

WANG Wenke¹, YIN Hongmei², HUANG Jinting³, LI Juntong¹

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. The First Institute of Geo-Environment Investigation, Henan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zhengzhou, Henan 450045, China; 3. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Groundwater evaporation is one of the important discharge item in the calculation of water balance in arid areas. Due to the highly non-linear soil water transport in the vadose zone and the complexity of water dynamic at the atmospheric-surface interface, estimation of groundwater evaporation has been the difficult issue of groundwater resources evaluation. In this study, the E601 type lysimeter was used in the Henan Township equilibrium test site in Wushen County of Inner Mongolia, and the in-situ experiment on surface water evaporation and groundwater evaporation for four typical vadose zone lithologies (sandstone K_1 , Salawusu sand Qp^{at+1} , sandy loam Qh^l , and aeolian sand Qh^{eol}) were established in the Mu Us sandy land. Combined with the long-term field observation data, the relationship among surface water and groundwater evaporation, groundwater evaporation and

收稿日期: 2020-12-05; 修订日期: 2021-03-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406504); 国家自然科学基金项目(41672250; U1603243)

第一作者: 王文科(1962-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事旱区地下水开发与生态效应的研究工作。E-mail: wenkew@chd.edu.cn

extinction depth were examined, and the estimation approach of groundwater evaporation was investigated. The results show that (1) the ratios of saturated evaporation to surface water evaporation are 0.60, 0.77, 0.47 and 0.88 for four typical vadose zone lithologies (sandstone, Salawusu sand, sandy loam, and aeolian sand), respectively, indicating that the surface water evaporation value cannot be used to estimate groundwater evaporation, if used, the surface water evaporation value must be corrected. (2) Based on the observation data of lysimeter and the steady-state analytical solution of soil water movement equation, the key empirical coefficients c of four typical vadose zone lithologies (sandstone, Salawusu formation sand sand, sandy loam, aeolian sand) are Obtained, which are 628 932.63, 165 058.71, 48 948.21 and 1 525 104.031 m^{-2} , respectively. (3) According to the stable evaporation formula, the groundwater extinction depth of four typical vadose zone lithologies (sandstone, Salawusu sand, sandy loam, and aeolian sand) is about 60 cm in the Ordos Basin. The results are verified by unsteady evaporation experiment in the laboratory, which may provide important parameter basis for water resources assessment in the study area.

Keywords: evaporation; groundwater; lysimeter; analytical solution; Mu Us sandy land

在干旱半干旱地区,地下水是人类生产生活的重要水源,有时甚至是唯一水源。作为水均衡计算的重要组成部分,旱区地下水对蒸发的贡献一直是地下水资源评价、水量平衡计算颇为关注的要素。全球陆地面积的 47.2% 以上属于干旱半干旱地区^[1],植被覆盖率较低,甚至完全裸露^[2-3],在蒸发过程中消耗近 25% 的太阳辐射能量^[4-6]。裸地蒸发耗散的水分一部分来自地下水,一部分来自地下水面上包气带水^[7]。准确量化包气带—地下水系统水分蒸发过程中的能量和质量传输对于提高干旱区水文循环的认识以及环境、农业和工程应用至关重要^[8]。

裸土蒸发过程一般可划分为两个阶段:第一阶段近地表土壤的水分充足(例如雨后或者地下水位埋深小于毛细上升高度的情况),蒸发速率由大气条件控制,裸土蒸发强度主要由气候条件控制;第二阶段由于蒸发进一步加剧,土壤水分逐渐减少,即土壤水分供给不充分,相对第一阶段,蒸发强度减小,裸土蒸发强度主要由土壤含水率和气候条件共同控制。阶段一和阶段二之间,蒸发速率有明显的变化,称为转化阶段。在地下水位埋深较浅地区,且毛细上升高度大于地下水埋深时,地下水通过毛细作用对近地表土壤输送水分,相当于近地表土壤水分充足的蒸发过程,当毛细作用对包气带水分的补给量与蒸发量基本平衡时,可形成稳定蒸发^[9]。当地下水位埋深大于毛细上升高度时,裸土的蒸发处于第二阶段,当地下水位埋深远大于毛细上升高度时,地下水对土面蒸发基本没有贡献。从多年平均的角度,确定潜水的稳定蒸发量至关重要,现有的计算潜水稳定蒸发方法大致可以分为经验公式法和基于包气带水分运移模型的方

法。经验公式法应用潜水蒸发与潜在蒸发的比值,即蒸发系数看作与水位埋深和土壤质地具有相关性,通过构建经验函数关系式表达二者的关系。基于包气带水分运移模型的方法是利用非饱和土壤水分运移方程的解析解或者数值解计算潜水蒸发。由于地下水蒸发的复杂性和蒸发过程的高度非线性,无论是经验公式法还是水分运移模型法,都存在优缺点,在实际应用中具有一定的局限性^[10-13]。本文的主要目的是通过野外原位长期观测数据,结合包气带水分运移模型的解析解,解析毛乌素沙地地下水蒸发与水面蒸发、地下水埋深的关系,估算研究区典型包气带岩性的地下水蒸发量。

1 理论与试验

1.1 潜水面稳定蒸发

当外界条件不变,潜水面补给非饱和带的水量和蒸发量平衡时,剖面含水率不随时间变化,称为稳定蒸发。在无补给或蒸发大于补给的情况下,非饱和带水分不断消耗,含水率随时间变化,称为不稳定蒸发。土面蒸发强度和潜水蒸发强度的概念不同,但在稳定蒸发阶段两者数值上相等。

假设潜水蒸发是水流在包气带垂直方向上的一维运动。取地表为坐标原点,向下为正,包气带水分运动的数学模型为^[14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial z} K(\psi) = 0 \\ K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) = E_s, z = 0 \\ \psi = 0, z = d \end{cases} \quad (1)$$

假定非饱和带渗透系数为:

$$K(\psi) = \frac{K_s}{1 + c\psi^2} \quad (2)$$

式(1)的解为:

$$E_s \approx \frac{K_s \pi^2}{4cd^2} \quad (3)$$

式中: ψ ——压力势;

E_s ——土面蒸发量,特定情况下,潜水面蒸发量近似等于土面蒸发量;

d ——潜水埋深;

$K(\psi)$ ——非饱和渗透系数;

K_s ——饱和渗透系数;

c ——经验系数。

式(3)表明,均质土壤的土面蒸发强度 E_s 在稳定蒸发条件下与饱和渗透系数近似成正比,与潜水面埋深 d 的平方近似成反比。同时可以利用式(3)估算极限蒸发深度。

1.2 试验

1.2.1 稳定地下水位蒸发试验

蒸发试验在内蒙古乌审旗河南乡气象站院内开展。试验采用 E601 型蒸发桶,蒸发桶高 70 cm,共 4 组 12 个。蒸发桶放置在长 4 m、宽 3 m、深 0.9 m 的探坑中,桶外的空间填充风积沙与池边齐平。探坑的四周与底均用砖浆砌,且涂防水水泥,保证构筑的池子四周与底部均不漏水(图 1)。每 3 个桶为 1 组,分别装入风化砂岩(K_1)、萨拉乌苏组砂(Qp^{a+l})、砂质壤土(Qh^l)与风积沙(Qh^{eol})4 种试样。风化砂岩为紫红色白垩系砂岩,萨拉乌苏组砂为灰黑色河湖相沉积物,砂质壤土为灰白色湖泊相沉积物,风积沙为现代风成淡黄色粉细砂。试样装入桶中时捣实且反复用水饱和与排水,直至试样的密实程度与实际非常接近。在池子的一端,相距池边 40 cm 处修一过水墙,过水墙将池中的风积沙与供水水槽分开。供水水槽中注水至池边沿 5 cm,目的在于使蒸发桶外的风积沙处于饱和状态,为蒸发桶中各种试样在作蒸发试验时创造一个蒸发环境。蒸发桶中的水位保持在埋深 5 cm。一组蒸发桶在其底部通过铝塑管构成串联并与室内的马氏瓶连接,构成测量系统。测量系统的调试方法与水面蒸发测量系统调试方法相同。

由于蒸发桶中的水面在试样面下 5 cm 处,所以由马氏瓶补偿仪测得的蒸发量可认为是试样的饱和土面蒸发量。马氏瓶控制的有效内部面积为 37.98 cm^2 ,与蒸发桶口的面积之比为 1 : 78.98,可以保证能够满

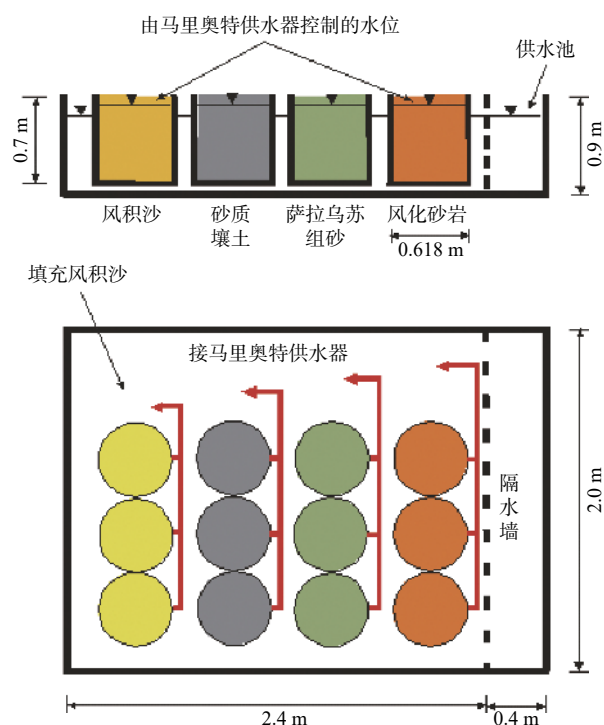


图 1 土面蒸发试验室外系统

Fig. 1 Set-up of lysimeters

足测量精度。蒸发量数据的采集频率为 6 ~ 12 次/d。由河南乡气象站观测试验期间 E601 型水面蒸发量。

1.2.2 非稳态潜水蒸发试验

非稳态潜水蒸发试验在室内开展。试验采用高 155 cm, 直径为 25 cm 的有机玻璃柱作为蒸渗柱, 底部与马氏瓶相连接。蒸渗柱上部安装一个红外灯提供热源。试验开始前, 将风积沙用蒸馏水反复冲洗 3 次, 然后烘干。蒸渗柱底部铺设滤网、在滤网上铺设砾石层, 安装多孔滤板, 保持滤板水平。在滤板上铺设滤网, 在滤网之上铺设粗砂层和中砂层, 完成底部装填。每次装填 5 cm 厚的风积沙, 从底部缓慢补进蒸馏水, 至风积沙表面出现水膜, 饱水半小时, 然后排水, 直至排完。重复 3 次, 保证土柱内风积沙均匀密实。再装填 5 cm 厚的试样, 重复冲排水过程, 直至整个土柱装填完成后, 从底部缓缓充水至淹过试样表面, 饱水 2 d, 排水取干容重样, 最终干容重为 1.5 g/cm^3 。试验时调节马氏瓶平衡杯高度控制蒸渗柱内水位, 通过马氏瓶测定蒸渗柱蒸发速率, 在蒸渗柱侧面观察干表层的形成和变化。

2 结果分析

2.1 不同介质饱和状态下潜水稳定蒸发

表 1 为不同介质在饱水的情况下(水面埋深 5 cm), 土面蒸发的实际观测结果。由表 1 看出, 四种试样蒸

发强度皆小于淡水的稳定蒸发。其中风积沙的蒸发强度最大,砂质壤土的蒸发强度最小。风化砂岩、萨拉乌苏组砂、砂质壤土、风积沙在水位埋深位 5 cm 时,试验期内平均蒸发量与水面蒸发量的比值分别为: 0.60, 0.77, 0.47, 0.88。由此可见,尽管介质均为饱和状态,但土面蒸发强度存在一定的差异,且与水面蒸发强度差异较大。

表 1 不同介质的蒸发量

Table 1 Evaporation for different media

日期	蒸发量/mm				
	风化砂岩	萨拉乌苏组砂	砂质壤土	风积沙	淡水
9日20:00—10日20:00	2.3	3.2	1.8	3.5	3.9
10日20:00—11日20:00	2.1	2.7	1.8	3.1	3.7
11日20:00—12日20:00	2.2	2.6	1.6	3.1	3.4

2.2 非稳态潜水蒸发

非稳态潜水蒸发速率随时间变化结果见图 2。蒸发第一阶段观测的蒸发速率约为 0.80~1.48 cm/h,持续了约 9 h,整体上维持在一个较高的水平且随时间变化幅度不大,该阶段地下水位埋深变化范围为 0~32.1 cm。之后蒸发速率进入一个快速下降阶段,地表蒸发强度由 1.48 cm/h 快速降低到 0.03 cm/h,地下水位随着蒸发持续不断降低,由 32.1 cm 下降到 60.4 cm,该阶段一共持续了 55 h。第 64 小时蒸发桶表面开始形成干沙层,说明表土层与地下水之间的水力联系开始脱节,此时对应的水位埋深为 60.4 cm。之后,蒸发进入蒸发强度随埋深衰减阶段。试验持续进行近 250 h 后,水位埋深由 60.4 cm 增加至 70.7 cm,土壤明显分为干湿两层,试验结束时,干沙层厚度最终稳定在约 5.3 cm。

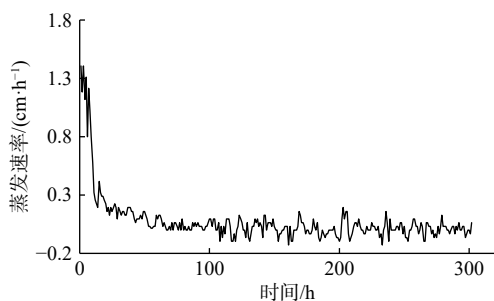


图 2 风积沙蒸发速率随时间变化关系

Fig. 2 Variation of evaporation rate for the aeolian sand

3 潜水蒸发的估算

根据式(3)可知,对于某一个岩性(K_s 确定)、地下

水埋深确定(即 d 已知),根据试验获得某一岩性稳定的土面蒸发量,可算得经验系数(c),进而可算得土面蒸发量。根据本次试验结果,计算获得的 c 值见表 2。

表 2 经验系数 c 平均值Table 2 values of unknown c

	风化砂岩	萨拉乌苏组砂	砂质壤土	风积沙
$K_s/(m \cdot d^{-1})$	1.40	0.47	0.085 7	4.98
c/m^{-2}	628 932.63	165 058.71	48 948.21	1 525 104.03

利用表 2 获得的参数 c 平均值,基于式(3),计算获得四种岩性蒸发量随地下水埋深的变化规律,见图 3。以马氏瓶观测精度 0.1 cm 判断,风化砂岩、萨拉乌苏组砂、砂质壤土、风积沙四种不同岩性潜水极限蒸发深度分别为: 66.0, 74.0, 58.0, 79.0 cm。由于稳态蒸发试验和非稳态蒸发试验蒸发环境不同,计算获得的极限蒸发深度和观测得到的极限蒸发深度有一定差异,但二者基本相吻合。

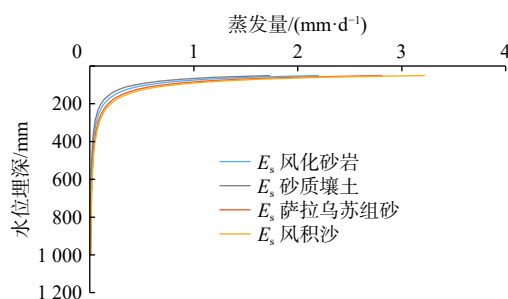


图 3 不同岩性潜水蒸发随深度变化规律

Fig. 3 Variation of phreatic evaporation of different soils with depth to water table

4 讨论

受限于非饱和带水分运移的非线性和土壤一大气界面动力学过程的复杂性,建立理论可靠、试验简便、技术经济合理的潜水面蒸发计算方法目前仍然是地下水资源评价中的一个难题。基于野外原位试验与非饱和带水分运动理论,获得了稳定蒸发条件下土壤蒸发的近似解析解。当含水层岩性一定时,在测定垂向饱和渗透系数和野外观测试验的基础上,确定饱和渗透系数与非饱和土压力势之间的经验系数 c ,利用式(3)计算不同地下水埋深情况下的潜水稳定蒸发强度,经过室内外试验验证,该方法与试验结果基本一致,可以作为多年平均潜水蒸发强度的估算。

为证实该方法的可行性,基于野外地下水稳定蒸发试验,获得了风化砂岩、萨拉乌苏砂、砂质壤土、风

积沙四种不同岩性在地下水水位埋深为 5 cm 时的蒸发量,推求了经验系数 c 值,为鄂尔多斯盆地风沙滩地下水资源评价提供了依据。同时,为降低实际工作中地下水蒸发观测试验的人力和物力投入,建立了地下水稳定蒸发与水面蒸发的比例关系,为地下水资源评价时,充分利用气象观测站观测的水面蒸发量提供了行之有效的方法。

本文提出的方法可以判断毛细管水与蒸发面水力联系断裂的地下水蒸发深度,估算不同岩性、不同地下水埋深的地下水蒸发量。利用野外试验数据,得到了研究区土壤蒸发量与不同地下水埋深的关系曲线,发现研究区地下水埋深小于 20 cm 时,不同岩性的蒸发量差异显著;地下水埋深大于 60 cm 时,不同岩性的土壤蒸发量相差不大(小于 0.01 mm/d),说明区内潜水极限蒸发深度约为 60 cm,与长期观测的非饱和带土壤温度变化基本一致。因此,以往地下水资源评价中^[15],将地下水极限蒸发深度确定为 300 cm 值得商榷。

由野外原位试验和观测结果可以看出,在相同气象条件下,不同土壤的饱和裸土蒸发量和自由水面蒸发量之间存在着差别,差别来自于土质类型,自由水面和饱和裸土的热容存在差异,这种差异是自由水面蒸发和饱和裸土蒸发量差别的主要原因。该结果隐含着,在实际计算裸土蒸发时,不能应用自由水面蒸发强度作为参考点估算非饱和土的蒸发量,宜采用饱和裸土的蒸发强度作为参考点。

值得指出的是,鉴于充足供水时地下水蒸发消耗最大,本文提出的方法是基于稳定流的假定,适用于稳态蒸发情况。实际工作中,地下水蒸发的估算一方面依赖于准确测定计算公式中的饱和渗透系数,另一方面,当岩性确定时 c 值固定,长系列的蒸发试验观测值将有助于推求可靠的经验系数 c 值。

5 结论

(1) 潜水蒸发是水平衡计算中的重要参数,潜水蒸发的动力学过程极为复杂,不仅受到地下水埋深、包气带岩性、包气带水分运移条件等因素的控制,而且还受到气候条件的控制。建立野外潜水蒸发试验基地,通过长期监测,结合包气带水分运移动力学模型,寻求简化解析解模型与关键参数之间统计关系,估算潜水蒸发强度,具有简单易行,为多年平均意义上估算不同岩性饱和裸土蒸发强度、不同潜水埋藏深度条件下潜水的蒸发强度提供了技术方法。

(2) 长期观测发现,鄂尔多斯盆地风沙滩饱和介

质的蒸发量小于自然水面蒸发量,四种典型包气带岩性(风化砂岩、萨拉乌苏组砂、砂质壤土、风积沙)饱和蒸发量与水面蒸发量比值分别为 0.60, 0.77, 0.47, 0.88。因此,在实际计算不同介质的蒸发强度时,不能用自由水面蒸发强度作为潜在蒸发强度参考点,如果运用,必须校正。

(3) 研究中获得的鄂尔多斯盆地风沙滩区潜水稳定蒸发计算的关键经验系数 c 为研究区水资源评价提供了参数依据。四种典型包气带岩性(风化砂岩、萨拉乌苏组砂、砂质壤土、风积沙)经验系数 c 值分别为 628 932.63, 165 058.71, 48 948.21, 1 525 104.031 m^{-2} 。

(4) 蒸发试验和稳定蒸发公式计算确定鄂尔多斯盆地风沙滩区四种典型包气带岩性(风化砂岩、萨拉乌苏组砂、砂质壤土、风积沙)潜水极限蒸发深度约为 60 cm。

参考文献 (References) :

- [1] BANIMAHDI S A, ZAND-PARSA S. Simulation of evaporation, coupled liquid water, water vapor and heat transport through the soil medium[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 130: 168 – 177.
- [2] KATATA G, NAGAI H, UEDA H, et al. Development of a land surface model including evaporation and adsorption processes in the soil for the land air exchange in arid regions[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(6): 1307 – 1324.
- [3] 席丹, 王文科, 赵明, 等. 玛纳斯河流域山前平原区蒸发时空气异质性分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 25 – 34. [XI Dan, WANG Wenke, ZHAO Ming, et al. Analyses of the spatio-temporal heterogeneity of evapotranspiration in the piedmont of the Manas River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 25 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [4] TRENBERTH K E, FASULLO J T, KIEHL J. Earth's global energy budget[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(3): 311 – 324.
- [5] 霍世璐, 王文科, 段磊, 等. 霍城县地下水资源构成变化及驱动力分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 51 – 59. [HUO Shilu, WANG Wenke, DUAN Lei, et al. An analysis of groundwater resources composition and driving force in Huocheng County[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 51 – 59. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 阴小伟, 吴一平, 赵文智, 等. 西北旱区潜在蒸散发的气候敏感性及其干旱特征研究[J]. 水文地质工程地

- 质, 2021, 48(3): 107 – 110. [YIN Xiaowei, WU Yiping, ZHAO Wenzhi, et al. Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3): 107 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [7] LAUTZ L K. Estimating groundwater evapotranspiration rates using diurnal water-table fluctuations in a semi-arid riparian zone[J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16(3): 483 – 497.
- [8] ZHANG C M, LI L, LOCKINGTON D. Numerical study of evaporation-induced salt accumulation and precipitation in bare saline soils: Mechanism and feedback[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(10): 8084 – 8106.
- [9] ZHANG C M, LI L, LOCKINGTON D. A physically based surface resistance model for evaporation from bare soils[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(2): 1084 – 1111.
- [10] 王文科, 宫程程, 张在勇, 等. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 702 – 718. [WANG Wenke, GONG Chengcheng, ZHANG Zaiyong, et al. Research status and prospect of the subsurface hydrology and ecological effect in arid regions[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 702 – 718. (in Chinese with English abstract)]
- [11] WANG W K, ZHANG Z Y, YEH T C J, et al. Flow dynamics in vadose zones with and without vegetation in an arid region[J]. *Advances in Water Resources*, 2017, 106: 68 – 79.
- [12] ZHANG Z Y, WANG W K, WANG Z F, et al. Evaporation from bare ground with different water-table depths based on an in situ experiment in Ordos Plateau, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(5): 1683 – 1691.
- [13] WANG W K, DUAN L, YANG X T, et al. Shallow groundwater hydro-chemical evolution and simulation with special focus on Guanzhong basin, China[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2013, 12(7): 1447 – 1455.
- [14] 朱学愚, 谢春红. 地下水运移模型[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. [ZHU Xueyu, XIE Chunhong. Groundwater transport model[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1990. (in Chinese)]
- [15] 中国地质调查局. 水文地质手册[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 2012. [China Geological Survey. Handbook of hydrogeology[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese)]

编辑: 张若琳