

地下水不同盐度条件潜水蒸发特性及其 简化模型适用性评价

茹秋瑾¹, 杨军超², 李晓琳^{1,3,4}

(1. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710010; 3. 西安理工大学
水利水电学院, 陕西 西安 710048; 4. 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;)

摘要: 潜水蒸发机理可通过毛细水上升特性加以揭示, 其中极限潜水蒸发强度(E_{\max})是潜水蒸发计算问题中不可或缺参数, 可利用 Gardner 模型进行估算。利用 Gardner 模型估算 E_{\max} 时, 导水率计算中的参数 b 常被忽略, 虽然模型得以简化, 但估算精度受到影响。因此, 参数 b 如何影响 E_{\max} 估算精度仍有待明确。选取 3 种不同地区壤土在实验室开展毛细水上升和一维土柱蒸发试验, 地下水供水水源为 K/Na - Cl 型盐溶液(浓度为 1、5、30 g/L) 并以蒸馏水作为对照组(CK), 观测毛细水上升并计算 E_{\max} , 而后对 Gardner 模型中参数 b 的敏感性进行评价。结果表明: 与 CK 相比, 盐溶液供水条件下毛细水上升速率较大, 进而增强了 E_{\max} ; 对于地下水为 1 ~ 30 g/L 的 KCl 和 NaCl 溶液, 毛细水上升速率和 E_{\max} 均表现为随浓度增加而减小。在采用 Gardner 模型进行 E_{\max} 估算时, 忽略参数 b 和考虑参数 b 分别导致高估和低估, 但考虑参数 b 的 Gardner 模型具有更高精度(相对误差介于 1.16% ~ 4.50%); 忽略参数 b 对 E_{\max} 的影响随 b 值增加而逐渐减弱。提高 E_{\max} 估算精度有利于制定合理的农田灌溉制度, 同时有利于揭示潜水蒸发内在机理。

关键词: 地下水盐度; 潜水蒸发; 毛细水上升; Gardner 模型; 模型适用性评价

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0229-06

Characteristics of groundwater evaporation and applicability evaluation of the simplified model under different groundwater salinity conditions

RU Qiujin¹, YANG Junchao², LI Xiaolin^{1,3,4}

(1. Yangling Vocational and Technical College, Yangling 712100, China; 2. Hanjiang - to - Weihe River Valley
Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Shaanxi Province, Xi'an 710010, China; 3. Faculty of
Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
4. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region in China, Xi'an 710048, China)

Abstract: The capillary rise is capable of revealing the mechanism involved in groundwater evaporation. Among the parameters of this experiment, the maximum rate of groundwater evaporation (E_{\max}) is an indispensable parameter in the calculation of groundwater evaporation, which can be estimated by the Gardner model. When using the Gardner model, it has widely been accepted to ignore parameter b during hydraulic conductivity prediction for simplification purpose, which may yet affect the prediction accuracy. Therefore, an investigation on how b affects E_{\max} is necessary. Loam soil samples from Yangling, Changwu, and Linyi regions were selected for indoor capillary rise and one-dimensional evaporation experiments, with two solutes (KCl and NaCl) that were dissolved in groundwater at three concentrations (1, 5, and 30 g/L) and one control treatment (CK) of distilled water without any salt solutions. Then E_{\max} was calculated by the observation of the capillary rise and the sensitivity of b in the Gardner model was evaluated. Results indicated that the capillary rise rate of the treatments supplied by salty groundwater was

收稿日期: 2021-01-09; 修回日期: 2021-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51738012)

作者简介: 茹秋瑾(1986-), 女, 陕西黄陵人, 硕士, 讲师, 研究方向为水利工程。

通讯作者: 李晓琳(1985-), 男, 陕西富平人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为节水与水回用。

larger than that supplied by distilled water, which further led to a larger E_{\max} ; besides, the capillary rise rate and E_{\max} decreased with the increase of the salt concentration when the concentration of KCl and NaCl solutes was in the range of 1–30 g/L. Furthermore, during the prediction of the Gardner-model-based E_{\max} , ignoring b and considering b always caused an overestimation and underestimation, respectively. And the Gardner model considering b had higher accuracy for E_{\max} prediction, with the relative error of 1.16%–4.50%. Moreover, the influence of ignoring b on E_{\max} gradually weakened with the increase of the b value. Improving the accuracy of E_{\max} prediction can benefit the decision-making of cropland irrigation schemes and the understanding of groundwater evaporation mechanism.

Key words: groundwater salinity; groundwater evaporation; capillary rise; Gardner model; model applicability evaluation

1 研究背景

地下水是一种重要水资源,在地下水浅埋区,地下水通过毛管上升对包气带的补给作用明显,且毛细水上升可以用来描述地下水的补给量,潜水蒸发在农田水循环中发挥着重要作用,在农田水利领域备受重视^[1-3]。在地下水位较高地区,地下水中的可溶性盐在蒸发作用下随土壤水向上迁移,并在土体中聚集,增加了土壤盐渍化风险,危害作物生长,成为制约农业可持续发展的障碍^[4-5]。潜水蒸发与土壤盐分积累和土壤盐渍化密切相关,开展浅埋区潜水蒸发特性的研究对制定灌溉制度和淋洗农田盐分均具有重要的实践意义。

已有的关于潜水蒸发特性的研究成果多集中于淡水地下水^[6-9],在一定程度上忽略了地下水为盐水的情况,然而在地下水浅埋干旱地区,地下水中往往存在盐分,这些盐分很可能改变潜水蒸发挥律,有关地下水含盐情况下的毛细水上升和潜水蒸发特性亟需探索。科学评价潜水蒸发对土壤盐渍化研究、地下水数值模拟参数反演、地下水循环研究以及地下水资源科学评价与管理均发挥着重要作用^[10]。目前,较为常用的潜水蒸发计算方法主要有蒸渗仪直接测定法和经验公式法,农田实测法中蒸渗仪尺寸和材料的选择往往对观测精度具有明显影响,而经验公式法缺乏理论支撑,不利于其机理研究。基于土壤水动力学理论的极限蒸发强度(E_{\max})模型计算方法将地下水蒸发看作蒸发条件下的非饱和土壤水运动问题,当大气蒸发能力趋于无穷大时,潜水蒸发强度则趋于 E_{\max} ^[11],可用 Gardner 模型进行估算。但采用该方法计算导水率(即 $K = a/(s^n + b)$)时,通常忽略常数 b 以实现模型简化的目的,虽然模型得以简化,但在很大程度上将影响 E_{\max} 的估算精度,关于忽略参数 b 如何影响 E_{\max} 估算精度、简化模

型是否可靠等问题并未引起广泛关注。

本研究选用最为常见的 K–Cl 和 Na–Cl 型盐溶液作为供水水源,以陕西杨凌、长武地区和山东临沂地区壤土为例,开展毛细水上升和潜水蒸发试验,对不同地下水盐度条件下的毛细水上升和恒定埋深潜水蒸发特性进行研究,并基于土壤水动力学理论采用 Gardner 模型对 E_{\max} 进行估算,进一步对该模型中参数 b 对 E_{\max} 估算精度的影响进行评价,进而评判在 E_{\max} 估算问题中 Gardner 模型是否可以简化。该研究可为农田盐碱化防治提供理论依据。

2 资料来源与研究方法

2.1 供试材料

供试土样取自陕西杨凌(YL)、陕西长武(CW)、山东临沂(LY)地区农田 0~30 cm 耕作土层,采集完成后充分混合。全部土样经风干、磨碎、去除杂质后过 2 mm 筛分,采用激光粒度仪测定土壤颗粒组成(表 1),全部供试土样均为非盐碱土。为探究盐溶液供水条件潜水蒸发特性,并根据微咸水(盐浓度 1~3 g/L)、咸水(盐浓度 3~10 g/L)和盐水(盐浓度 10~50 g/L)矿化度范围,选用浓度为 1、5、30 g/L 的 KCl 和 NaCl 溶液分别作为供水水源(分别记作处理 K-1、K-5、K-30、Na-1、Na-5、Na-30)并以蒸馏水作为对照组(记作处理 CK)。

表 1 供试土样颗粒组成

土样	黏粒/ %	粉粒/ %	砂粒/ %	土壤 质地	预设容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
YL	16.32	34.56	49.12	壤土	1.35
CW	8.92	40.45	50.63	壤土	1.35
LY	13.86	37.73	48.41	壤土	1.40

毛细水上升试验装置和恒定地下水浅埋条件潜水蒸发试验装置主要包括有机玻璃土柱(高 60 cm,

内径 15 cm)、有机玻璃管(内径 2.9 cm)、马氏瓶、灯泡等。

2.2 试验设计与方法

毛细水上升试验:将供试土样按预设容重装入有机玻璃管中,装土高度为 30 cm,并在底部用纱网包裹,固定于铁架台,底端放入与供水水源连通的水槽内(见图 1(a))。记录湿润锋到达顶部所需的时间 T 。由于管径远大于土壤粒径,故忽略管径对毛细作用的影响,可认为毛细水上升仅由毛管作用所致。各处理均进行 3 次重复。

定水位潜水蒸发试验:将供试土样按设定容重装入有机玻璃中形成土柱,并在土柱底部设 10 cm 厚砂石反滤层;将不同类型和浓度的盐溶液盛于马氏瓶中,马氏瓶与土柱底部连通以实现持续供水,供水水头恒定为 50 cm(见图 1(b))。当湿润锋上移至土样表面且毛细上升水稳定时,移除土表覆盖的塑料薄膜,并将土柱置于 275 W 远红外灯下(土样表面距光源垂直距离为 40 cm),昼夜蒸发试验持续 20 d,每日 8:00 读取马氏瓶内水位刻度以计算日潜水蒸发量。各处理均进行 3 次重复。

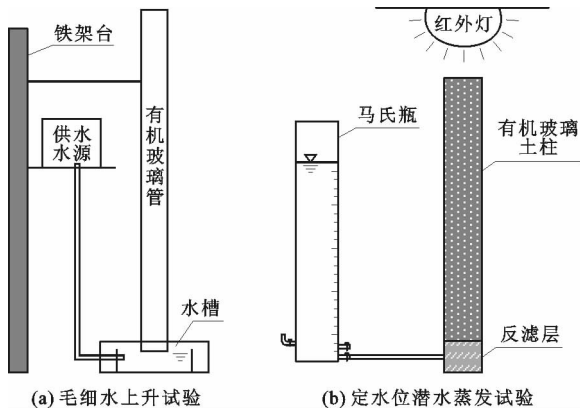


图 1 毛细水上升与潜水蒸发试验装置示意图

2.3 模型构建

对于某种均质土壤,潜水位埋深为 H ,当处于稳定蒸发时,土壤含水率和吸力分布如图 2 所示。

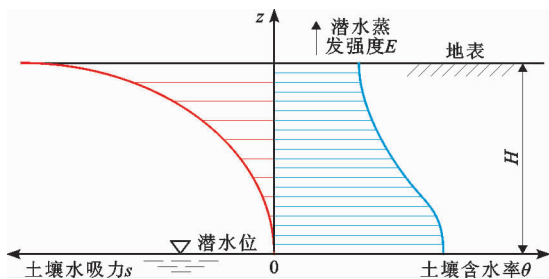


图 2 均质土壤稳定蒸发时含水率和吸力分布示意图

此时地表处的蒸发强度与任一断面处的土壤水

通量相等,即为潜水蒸发强度,其定解问题可用公式(1)描述。

$$\begin{cases} E = K(s) \cdot \left(\frac{ds}{dz} - 1 \right) \\ s = 0 \quad (z = 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 为潜水蒸发强度,cm/d; $K(s)$ 为导水率,cm/d; s 为土壤水吸力,cm; z 为垂直坐标(自地下水水位起向上为正),cm。

Gardner 导水率计算公式为^[12]:

$$K(s) = \frac{a}{s^n + b} \quad (2)$$

对公式(1)进行积分,同时结合公式(2),则 z 可表示如下:

$$z = \int_0^s \frac{1}{\frac{E}{a}(s^n + b) + 1} ds \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 n 均为常数,其中 n 值可为 1.0、1.5、2.0、3.0、4.0,土质越粗则 n 值越大。

将 $z = H$ 代入公式(3)中,便可获取地表处的土壤水吸力 s_H 与稳定蒸发强度 E 的关系,如公式(4)所示。

$$H = \int_0^{s_H} \frac{1}{\frac{E}{a}(s_H^n + b) + 1} ds \quad (4)$$

由公式(4)可知,当 H 一定时, E 随着 s_H 的增大而增大;当地表处土壤风干时, s_H 则趋于无穷大,此时 E 将达到最大可能值。由于稳定蒸发强度即为定水位下的潜水蒸发强度,故可将稳定蒸发强度的最大可能值 E_{max} 定义为潜水极限蒸发强度^[13]。

对于本研究中所供试的均质土样,取 $n = 2$ ^[14];当 s_H 趋于无穷大时,可分别构建出忽略参数 b (简化模型)和未忽略参数 b 时的 Gardner 模型,分别如公式(5)、(6)所示。

$$E_{max} = 2.46 aH^{-2} \quad (5)$$

$$E_{b,max} = \frac{a}{2b} \left(\sqrt{\frac{\pi^2 b}{H^2} + 1} - 1 \right) \quad (6)$$

3 结果与分析

3.1 不同地下水矿化度对毛细水上升的影响

水分蒸发的内在驱动力为土壤毛管作用,故需评价地下水类型和矿化度对毛细水上升的影响。湿润锋到达土壤表面所需要的时间 T 可以反映蒸发强度,即时间 T 越短,则毛管作用越强,在外部环境相同条件下其蒸发强度越高。通过试验得出,对于 YL、CW 和 LY 土样的 CK 处理, T 分别为 396、388 和 410

min,均大于盐溶液供水处理;在地下水矿化度为1~30 g/L范围内,KCl和NaCl处理的 T 值均表现为随浓度增加而增加。表明土壤水中KCl和NaCl会在一定程度上增强毛管作用,加快水分上升,使得在外部条件相同时的蒸发强度增强。

3.2 不同地下水矿化度对 E_{\max} 的影响

试验中在持续光照和恒定埋深条件下,历时20 d后各处理潜水蒸发强度趋于稳定并达到最大值,各土样不同处理的潜水极限蒸发强度测定值与计算值如表2所示。

表2 各土样不同处理的潜水极限蒸发强度测定值与模型计算值

土样	处理	T/min	E_{\max} 测量值/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	E_{\max} 模型计算		$E_{b \max}$ 模型计算	
				计算值/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	相对误差/ %	计算值/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	相对误差/ %
YL	CK	396	7.07	7.38	4.38	6.89	-2.55
	K-1	272	10.12	10.83	7.02	10.00	-1.19
	K-5	305	9.53	10.01	5.04	9.26	-2.83
	Na-1	280	10.27	10.93	6.43	10.06	-2.04
	Na-5	315	9.69	10.24	5.68	9.48	-2.17
	Na-30	337	8.67	9.02	4.04	8.28	-4.50
CW	CK	388	7.12	7.54	5.90	7.02	-1.40
	K-1	280	9.31	9.89	6.23	9.09	-2.36
	K-5	320	8.88	9.35	5.29	8.62	-2.93
	Na-1	310	9.50	10.04	5.68	9.25	-2.63
	Na-5	353	8.90	9.45	6.18	8.73	-1.91
	Na-30	384	8.05	8.51	5.71	7.87	-2.24
LY	CK	410	6.92	7.50	8.38	7.00	-1.16
	K-1	277	9.81	10.39	5.91	9.59	-2.24
	K-5	310	9.25	9.75	5.41	9.01	-2.59
	Na-1	308	9.74	10.28	5.54	9.46	-2.87
	Na-5	334	9.41	9.79	4.04	9.05	-3.83
	Na-30	361	8.55	9.05	5.85	8.35	-2.34

由表2中可看出:(1) E_{\max} 受溶质类型和浓度共同影响,进而导致不同溶质和浓度处理的 E_{\max} 存在一定差异;对于YL、CW和LY土样的CK处理, E_{\max} 分别为7.07、7.12和6.92 mm/d,且均小于盐溶液供水处理;在地下水矿化度1~30 g/L范围内,KCl和NaCl处理的 E_{\max} 值均表现为随浓度增加而减小。(2)采用Gardner模型对 E_{\max} 进行估算时,在忽略和未忽略参数 b (公式(5)、(6))两种情况下, E_{\max} 估算结果与其观测结果表现出相同的变化趋势;与实测值相比,忽略参数 b 导致 E_{\max} 高估,考虑参数 b 导致 E_{\max} 低估, E_{\max} 计算值与测量值之间的

相对误差介于4.04%~8.38%, $E_{b \max}$ 计算值与测量值之间的相对误差介于1.16~4.50%,表明采用考虑参数 b 的Gardner模型对 E_{\max} 估算的精度更高。

3.3 参数 b 对 E_{\max} 的敏感性分析

引入敏感系数用以评价参数 b 对 E_{\max} 的影响,不同 n 值情况下的敏感系数 C_n 定义为:未忽略参数 b 时的潜水极限蒸发强度 $E_{b \max}$ 值与相应 n 值情况下潜水极限蒸发强度 $E_{\max(n)}$ 的比值,如公式(7)所示。

$$C_n = \frac{E_{b \max}}{E_{\max(n)}} \quad (7)$$

根据公式(7)可导出:

$$\begin{cases} \frac{C_{1.5}}{C_{2.0}} = \frac{E_{\max(2.0)}}{E_{\max(1.5)}} = \frac{0.65}{\sqrt{H}} \\ \frac{C_{2.0}}{C_{3.0}} = \frac{E_{\max(3.0)}}{E_{\max(2.0)}} = \frac{0.72}{\sqrt{H}} \\ \frac{C_{3.0}}{C_{4.0}} = \frac{E_{\max(4.0)}}{E_{\max(3.0)}} = \frac{0.86}{\sqrt{H}} \end{cases} \quad (8)$$

由公式(8)可知,当 $H > 0.86$ cm时, $C_{1.5}/C_{2.0}$ 、 $C_{2.0}/C_{3.0}$ 、 $C_{3.0}/C_{4.0}$ 均小于1,即 $E_{\max(2.0)} < E_{\max(1.5)}$ 、 $E_{\max(3.0)} < E_{\max(2.0)}$ 、 $E_{\max(4.0)} < E_{\max(3.0)}$,从数学角度进一步印证了粗质土潜水极限蒸发强度小于细质土潜水极限蒸发强度。

对于供试土样($n = 2.0$),敏感系数可用公式(9)进行表述,并可对参数 b 进行敏感性分析。由式(9)可知, $\partial C_{2.0}/\partial b < 0$,表明 $C_{2.0}(b)$ 为递减函数,即 $C_{2.0}$ 随着 b 值的增加而减小,亦即忽略参数 b 对 E_{\max} 的影响随 b 值增大而逐渐减弱。

$$\begin{cases} C_{2.0} = \frac{-H^2 + H\sqrt{H^2 + \pi^2 b}}{4.92b} \\ \frac{\partial C_{2.0}}{\partial b} = \frac{H}{4.92} \cdot \frac{H\sqrt{H^2 + \pi^2 b} - (H^2 + \frac{\pi^2}{2}b)}{b^2\sqrt{H^2 + \pi^2 b}} \end{cases} \quad (9)$$

4 讨论

潜水蒸发实际上是土壤毛细水上升的过程,毛细水上升特性可以用来阐释土壤水分蒸发机理,故将毛细水上升试验和潜水蒸发试验相结合具有理论意义。在地下水浅埋区,地下水中的可溶性盐在蒸发作用下随土壤水向上运移,广泛分布于土壤中甚至在土表聚集,最终导致土壤次生盐渍化。由此看出,明晰潜水蒸发特性对盐碱土富集地区的土壤盐碱化防控具有实践指导意义。

盐分对潜水蒸发的影响是通过改变毛细管力和毛细水上升而产生的^[15-16],即土壤中的可溶性盐对土壤孔隙和结构产生了显著影响^[17],进而影响土壤水分运动。在蒸发过程中,析出的盐分吸附在土壤团聚体表面,使土壤孔隙度和透水性发生变化,最终改变了水分运动特性。表2显示, E_{\max} 与 T 呈反比关系,即蒸发强度越小,毛细水上升速率越小,则湿润锋到达顶部所需时间越长,符合实际变化特征。同时表2也表明,与CK处理相比,盐溶液供水处理毛细水上升至土壤表面所需时间较短且极限潜水蒸发强度较大。分析认为,地下水中的可溶性盐在蒸发作用下随土壤水向上运移并滞留在土体中,水分散

失过程导致盐分析出结晶。对于矿化度较高的地下水,土壤毛管易被析出的盐分堵塞,增加了毛细管水的上升阻力,对于矿化度较低的地下水,虽然也有盐分析出,但土壤毛细管未被完全堵塞,而是部分沉淀的盐分被吸附在毛细管壁上,使得土壤毛管通道在一定程度上变细,增加了毛细吸力,进而加速了毛细水的上升^[18-19],即为水分蒸发的毛管力驱动机制。另一方面,土壤水溶液中的盐分析出使得土壤孔隙体积减小,导致运输土壤水汽的通道数量减少,从而对土壤水分蒸发产生了一定影响,并且因土壤孔隙体积减小所引起的毛细上升对潜水蒸发的影响大于因土壤通道数量减少对潜水蒸发的影响,最终导致试验中盐溶液供水处理的毛细水上升速率较快且潜水蒸发强度更大。此外,本试验中土柱底部持续供水,故土柱底部土壤盐溶液浓度高于顶部,因此底部土壤土水势较顶部低,加大了水分向下流动的驱动力,因此,随着地下水盐浓度的增加(1~30 g/L),水分向上流动的驱动力逐渐减弱,导致毛细水上升速率和 E_{\max} 均表现为随地下水盐浓度的增加而减小。

从理论上讲,基于土壤水动力学理论的 E_{\max} 计算结果应与其实测值相等,然而本研究发现,无论是是否忽略参数 b 均导致 E_{\max} 实测值与计算值之间存在差异,分析认为,实际地下水区域的自由水面与土体之间会存在残余空气,而本研究计算 E_{\max} 时并未考虑水面与土体之间空气对水流运动的影响;另外,实际农田中的层状土较均质土更为常见,不同土层之间往往存在阻力,而对于均质土而言则不考虑该阻力。虽然本试验以均质土体为研究对象,但人工装填土导致相邻土层界面处存在阻力,而基于土壤水运动学理论计算 E_{\max} 则为理想情况。

本研究仅对 K^+ 和 Na^+ 影响下的毛细水上升和潜水蒸发特性进行了研究,除此之外, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 也是土壤中常见的盐离子,不同价态会导致土壤胶体的稳定性及其对阳离子的亲和力产生差异^[20],从而使土壤水流运动表现出不同的特征。因此,其他类型盐离子对潜水蒸发特性的影响仍有待探索。在实际农田耕作层中,层状土更为常见且相邻土层土质通常不同,多孔介质物理性质的变化势必对其中水流运动特征造成影响,因此还需开展对层状土壤和不同质地土壤的毛细水上升和潜水蒸发特性的研究。本研究中蒸发试验是在连续光照条件下进行的,没有考虑昼夜交替和降水的影响,昼夜交替将导致上部土壤温度势发生变化,降水将导致上部土壤含水率增加从而减小土壤水势,进而改变土壤水运

动特性,在当前研究成果的基础上,还应进一步扩展非稳定蒸发情况下的潜水蒸发特性研究。

5 结 论

(1)与蒸馏水水源供水相比,KCl 和 NaCl 溶液(1~30 g/L)作为供水水源可在一定程度上加快土壤毛细水上升速度进而使 E_{\max} 值增大;对于 K/Na-Cl 型盐溶液供水情况,均表现为 E_{\max} 值随着盐溶液浓度的增加而减小。

(2)无论 Gardner 模型中的参数 b 是否被忽略,该模型均可用于估算 E_{\max} (相对误差介于 1.16%~8.38%)。Gardner 模型估算结果与实测值相比,忽略参数 b (简化模型)会导致 E_{\max} 高估,考虑参数 b 则导致 E_{\max} 低估;未忽略参数 b 的 Gardner 模型具有更高精度,忽略参数 b 对 E_{\max} 的影响随 b 值增大而逐渐减弱。在实际应用中,应根据需要与要求确定是否忽略该模型中的参数 b 。

参考文献:

- [1] 顾南,王振龙,蒋东进,等. 基于原状土蒸渗仪的潜水蒸发昼夜变化及差异性比较[J]. 水文,2019,39(2):44-48.
- [2] 卫磊,杨桂莲,鲁程鹏,等. 华北平原超采区浅层地下水埋深变化及控制因素分析[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(6):39-44.
- [3] 李玲,邵龙美,周金龙,等. 新疆和田河流域绿洲区地下水质量演化特征[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(1):63-71.
- [4] 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.
- [5] 邢旭光,赵文刚,马孝义. 盐渍土壤覆膜种植条件潜水蒸发的探讨与分析[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(1):57-65.
- [6] 文利军,史文娟,高志永,等. 不同覆膜开孔率下土壤水分和潜水蒸发的模拟研究[J]. 水土保持学报,2020,34(1):225-229.
- [7] 谭畅,伍靖伟,汪昌树,等. 基于溴离子示踪的干旱地区潜水蒸发规律研究[J]. 灌溉排水学报,2019,38(9):73-81.
- [8] TAN Shuai, WANG Quanjiu, XU Di, et al. Evaluating effects of four controlling methods in bare strips on soil temperature, water, and salt accumulation under film-mul-

- ched drip irrigation [J]. Field Crops Research, 2017, 214: 350-358.
- [9] TALEBNEJAD R, SEPASKHAH A R. Effect of different saline groundwater depths and irrigation water salinities on yield and water use of quinoa in lysimeter [J]. Agricultural Water Management, 2015, 148: 177-188.
- [10] 王健,梁杏,靳孟贵,等. 运用溴离子示踪法评价玛纳斯河流域平原区潜水蒸发 [J]. 地球科学,2020,45(3):1051-1060.
- [11] HU Shunjun, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al. Theoretical analysis of the limiting rate of phreatic evaporation for aeolian sandy soil in Taklimakan Desert [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(S2): 119-124.
- [12] GARDNER W R. Some steady-state solutions for the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table [J]. Soil Science, 1958, 85(4): 228-232.
- [13] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学 [M]. 北京:清华大学出版社,1988.
- [14] JOLLY I D, WALKER G R, THORBURN P J. Salt accumulation in semi-arid floodplain soils with implications for forest health [J]. Journal of Hydrology, 1993, 150(2-4): 589-614.
- [15] BERGSTAD M, OR D, WITHERS P J, et al. The influence of NaCl concentration on salt precipitation in heterogeneous porous media [J]. Water Resources Research, 2017, 53(2): 1702-1712.
- [16] BERGSTAD M, SHOKRI N. Evaporation of NaCl solution from porous media with mixed wettability [J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43: 4426-4432.
- [17] LIN Gaochao, CHEN Wenwu, LIU Peng, et al. Experimental study of water and salt migration in unsaturated loess [J]. Hydrogeology Journal, 2019, 27(5): 171-182.
- [18] 栗现文,周金龙,赵玉杰,等. 高矿化度对砂性土毛细水上升影响 [J]. 农业工程学报,2011,27(8):84-89.
- [19] 栗现文,周金龙,周念清,等. 潜水高矿化度对粉质粘土毛细水上升的影响 [J]. 干旱区资源与环境,2016,30(7):192-196.
- [20] 邢旭光,马孝义,康端刚. 盐阳离子类型及浓度对土壤持水及干缩开裂的作用效果 [J]. 农业工程学报,2016,32(9):115-122.