

# 不同土质条件下小麦生长期潜水蒸发量影响因素研究

徐荣艳<sup>1</sup>, 戴丽纳<sup>2</sup>, 傅国圣<sup>3</sup>, 江鹏<sup>1</sup>, 丁钰童<sup>1</sup>, 张美娜<sup>1</sup>, 王婉婉<sup>4</sup>, 王振龙<sup>5\*</sup>  
(1.河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2.淮委水文局(信息中心), 安徽 蚌埠 233022; 3.江苏省水文水资源勘测局泰州分局, 江苏 泰州 225317; 4.河北工程大学, 河北 邯郸 056021; 5.安徽省(水利部淮委)水利科学研究院 五道沟水文实验站, 安徽 蚌埠 233000)

**摘要:**【目的】揭示砂姜黑土与黄潮土条件下的气象因子和潜水埋深对小麦生长期潜水蒸发量的影响。【方法】基于五道沟实验站2010—2022年的逐日观测数据,采用相关分析和回归拟合方法,分析了砂姜黑土与黄潮土2种土质条件下的小麦生长期潜水蒸发量与7个气象因子之间的相关性,提出了潜水蒸发系数与0.2~5.0 m潜水埋深之间的非线性拟合函数。【结果】砂姜黑土潜水蒸发量与气象因子之间的相关程度从大到小依次为:地表温度、平均气温、水面蒸发量、日照时间、降水量、风速;黄潮土潜水蒸发量与气象因子之间的相关程度从大到小依次为:地表温度、日照时间、平均气温、水面蒸发量、降水量、风速。潜水蒸发系数与潜水埋深的非线性拟合结果表明,砂姜黑土小麦返青前呈逆函数关系( $R^2>0.95$ ),返青后呈对数函数关系( $R^2>0.85$ );黄潮土小麦呈对数函数关系( $R^2>0.75$ )。【结论】砂姜黑土潜水蒸发量临界埋深( $Z_m$ )介于2.0~3.5 m,黄潮土潜水蒸发量的 $Z_m$ 介于4.0~5.1 m。本研究构建的模型满足精度要求,可用于砂姜黑土与黄潮土小麦生长期潜水蒸发量的估算。

**关键词:** 潜水蒸发量; 气象因子; 潜水埋深; 小麦; 淮北平原

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023230

OSID:



徐荣艳, 戴丽纳, 傅国圣, 等. 不同土质条件下小麦生长期潜水蒸发量影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 19-23, 30.

XU Rongyan, DAI Lina, FU Guosheng, et al. Study of Factors Affecting Wheat Growth-stage Evapotranspiration under Various Edaphic Conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 19-23, 30.

## 0 引言

潜水蒸发量是指地下水对非饱和带土壤水的补给量,反映土壤水分从潜水面到非饱和区的向上运动过程。与裸地潜水蒸发量不同,作物生长条件下的潜水蒸发量不仅受气象条件、土壤质地、潜水埋深的影响,还受到作物生长期的干扰。【研究进展】王晓红等<sup>[1]</sup>利用作物生长程度累计温度( $GOD$ )拟合了小麦潜水蒸发模型。毛晓敏等<sup>[2]</sup>通过构建水热传输模型模拟了裸地潜水蒸发量和小麦生长条件下的潜水蒸发量。孟祥军<sup>[3]</sup>发现,地下水埋深和月份是潜水蒸发量主要影响因素。王振龙等<sup>[4]</sup>通过比较不同土壤质地与有无作物种植条件下潜水蒸发量的差异,提出了基于作物生育阶段和地下水埋深来计算作物潜水蒸发量

的方法。郝振纯等<sup>[5]</sup>通过分析不同时间尺度下裸土潜水蒸发量随潜水埋深、土质的变化规律,发现淮北平原潜水蒸发量不符合“蒸发悖论”。【切入点】以往研究只能反映作物潜水蒸发量的增减规律<sup>[6-7]</sup>,并未深入揭示各气象因子及潜水埋深与潜水蒸发量之间的关系。【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究构建了不同土质条件下潜水蒸发量与气象因子、潜水蒸发系数及潜水埋深的计算模型<sup>[8-10]</sup>,揭示小麦生长期潜水蒸发量的影响因素。【研究意义】本研究系统揭示了砂姜黑土和黄潮土小麦生长期潜水蒸发量的变化规律及其影响因素,研究结果可为不同土质条件下的田间土壤水分高效管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与试验条件

淮北平原总面积为37437 km<sup>2</sup>,该地区土壤以砂姜黑土(面积百分比为54%)和黄潮土(面积百分比为33%)为主。砂姜黑土0~2 m土壤体积质量为1.36 g/cm<sup>3</sup>,渗透系数为24.2 mm/h,黄潮土0~2 m土壤体积质量为1.42 g/cm<sup>3</sup>,渗透系数为20.2 mm/h。研究区

收稿日期: 2023-05-25 修回日期: 2023-07-14 网络出版日期: 2023-11-09

基金项目: 安徽省2022年度水科学联合基金项目(2208085US07);水利部重大科技项目(SKS-2022066)

作者简介: 徐荣艳(1998-),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。

E-mail: xry4eve@163.com

通信作者: 王振龙(1965-),男,教授,主要从事水文水资源研究。

E-mail: skywzl@sina.com

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

属暖温带半干旱半湿润季风气候，辐射量充足，降水资源丰富。五道沟水文实验站位于淮北平原中南部固镇县新马桥镇，站内配置有 62 套大型地中蒸渗仪原状土测筒。依据连通器原理，蒸渗仪马氏瓶中的水分通过水位平衡器供给测筒，使潜水地下水位稳定在设计水平，潜水蒸发量可根据马氏瓶刻度进行观测读取。

### 1.2 观测指标及方法

基于五道沟水文实验站内的 19 套 0.3 m<sup>2</sup> 口径的蒸渗仪测筒测定 2 种土质 0.2~5.0 m 潜水埋深下的潜

水蒸发量，观测方案见表 1。气象数据来源于气象观测场，观测要素包括：水面蒸发量 (mm)、平均气温 (°C)、降水量 (mm)、风速 (m/s)、日照时间 (h)、相对湿度 (%)、地表温度 (°C)。水面蒸发量采用 E 601 (0.3 m<sup>2</sup>) 型蒸发皿于每日 08:00 进行观测。依据水量平衡原理及 2010—2022 年潜水蒸发量与气象数据，分析 2 种土质下的潜水蒸发量与各气象因子的相关性及其不同埋深潜水蒸发量变化规律。实验站内的小麦生长期划分见表 2。

表 1 潜水蒸发量观测方案

Table 1 Experimental protocol of phreatic evaporation

下垫面	土壤质地	潜水埋深/m	蒸渗仪测筒
小麦	砂姜黑土	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、5.0	11 套
	黄潮土	0.2、0.4、0.6、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0	8 套

表 2 小麦生长期划分

Table 2 Fertility division of wheat

时间	1021—1120	1121—0228	0301—0420	0421—0531
生育阶段	出苗—分蘖	分蘖—越冬	返青—拔节	抽穗—成熟

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦潜水蒸发量与气象因子之间的相关性

由表 3 可知，砂姜黑土条件下，当潜水埋深低于 1.0 m 时，潜水蒸发量与各气象因子之间的相关性显

著，正相关程度从大到小依次为地表温度、平均气温、水面蒸发量、日照时间、降水量、风速；当潜水埋深大于 1.0 m 时，潜水蒸发量与风速、相对湿度及降水量之间没有显著相关性。黄潮土条件下，当潜水埋深在 0.6 m 以内时，潜水蒸发量与各气象因子之间的相关性显著，正相关程度从大到小依次为地表温度、日照时间、平均气温、水面蒸发量、降水量、风速；当潜水埋深大于 0.6 m 时，潜水蒸发量与风速和降水之间没有显著相关性。

表 3 小麦潜水蒸发量与气象因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between meteorological factors and phreatic evaporation of wheat

土壤质地	潜水埋深/m	风速		日照时间		相对湿度		降水量		平均气温		水面蒸发量		地表温度	
		r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
砂姜黑土	0.2	0.093**	0.002	0.474**	0	-0.425**	0	0.216**	0	0.488**	0	0.476**	0	0.597**	0
	0.4	0.104**	0	0.451**	0	-0.326**	0	0.213**	0	0.507**	0	0.479**	0	0.616**	0
	0.8	0.094**	0.002	0.397**	0	-0.288**	0	0.210**	0	0.584**	0	0.510**	0	0.687**	0
	1.0	0.090**	0.003	0.393**	0	-0.248**	0	0.314**	0	0.600**	0	0.489**	0	0.699**	0
	1.5	0.047	0.124	0.241**	0	-0.103	0.139	0.145	0.124	0.484**	0	0.350**	0	0.528**	0
黄潮土	0.2	0.091**	0.002	0.540**	0	-0.413**	0	0.098*	0.016	0.476**	0	0.484**	0	0.578**	0
	0.4	0.085**	0.004	0.532**	0	-0.371**	0	0.129**	0.001	0.528**	0	0.478**	0	0.635**	0
	0.6	0.078**	0.009	0.522**	0	-0.338**	0	0.158**	0	0.512**	0	0.464**	0	0.651**	0
	1.0	0.074	0.274	0.437**	0	-0.330**	0	0.076	0.369	0.575**	0	0.476**	0	0.671**	0

注 r 为相关系数；p 为显著性水平；\*\*在 0.01 级别（双尾）相关显著；\*在 0.05 级别（双尾）相关显著。

### 2.2 不同土质条件下小麦潜水蒸发量与气象因子之间的线性回归模型

针对砂姜黑土及黄潮土小麦建立气象因子与不同潜水埋深下各月潜水蒸发量之间的线性回归模型，结果见表 4。砂姜黑土拟合优度 (R<sup>2</sup>) 均大于 0.75，黄潮土拟合优度 (R<sup>2</sup>) 均大于 0.70，可见 2 种土质

不同潜水埋深下的回归模型均可用于潜水蒸发量的估算。

2021—2022 年小麦潜水蒸发量实测值与模型拟合值之间的平均相对误差见表 5。小麦生长期不同潜水埋深下的平均相对误差介于 0.003 3~0.180 3，表明拟合精度较高，模型适用性较好。

表 4 气象因子与小麦潜水蒸发量的拟合模型

Table 4 Fitting model of meteorological factors and phreatic evaporation of wheat

土壤质地	潜水埋深/m	R <sup>2</sup>	回归模型
砂姜黑土	0.2	0.894	$Eg=0.896X_3+0.909X_6+0.111X_1-2.023$
	0.4	0.810	$Eg=0.349X_2+1.341X_6-0.323X_5-2.014$
	0.8	0.797	$Eg=0.288X_2-0.276X_5-0.14$
	1.0	0.826	$Eg=0.273X_2-0.261X_5-0.148$
黄潮土	0.2	0.913	$Eg=1.062X_7+3.956X_3+0.91X_1-8.468$
	0.4	0.728	$Eg=0.650X_3-0.012X_4+0.899$
	0.6	0.808	$Eg=0.363X_3+0.145X_7+0.282X_1-0.309X_6-0.292$
	1.0	0.834	$Eg=0.347X_3+0.137X_7+0.266X_1-0.252X_6-0.431$

注  $Eg$  为各月平均潜水蒸发量 (mm);  $X_1$  为各月平均日照时间 (h);  $X_2$  为各月平均地表温度 (°C);  $X_3$  为各月平均水面蒸发量 (mm);  $X_4$  为各月平均相对湿度 (%);  $X_5$  为各月平均气温 (°C);  $X_6$  为各月平均风速 (m/s);  $X_7$  为各月平均降水量 (mm)。

表 5 小麦潜水蒸发量实测数据与拟合数据的平均相对误差

Table 5 Mean relative error of measured and fitted data of phreatic evaporation in wheat

时段	砂姜黑土/m				黄潮土/m			
	0.2	0.4	0.8	1.0	0.2	0.4	0.6	1.0
20211021—20211031	0.017 8	0.059 8	0.035 4	0.037 9	0.046 2	0.046 5	0.180 3	0.142 0
20211101—20211130	0.052 8	0.127 9	0.098 3	0.170 2	0.041 4	0.162 3	0.170 1	0.063 5
20211201—20211231	0.064 0	0.079 4	0.065 3	0.032 2	0.066 1	0.119 4	0.129 8	0.064 8
20220101—20220131	0.056 8	0.032 7	0.044 7	0.020 8	0.053 2	0.003 3	0.038 8	0.037 2
20220201—20220230	0.145 2	0.095 5	0.068 8	0.120 1	0.046 9	0.073 5	0.021 6	0.133 6
20220301—20220331	0.030 6	0.005 9	0.073 9	0.018 7	0.042 5	0.056 3	0.123 0	0.096 1
20220401—20220430	0.056 9	0.062 4	0.018 7	0.027 4	0.014 7	0.156 0	0.123 2	0.104 2
20220501—20220531	0.084 3	0.057 0	0.106 1	0.115 4	0.023 2	0.042 0	0.052 0	0.079 9

### 2.3 不同土质条件下小麦生长期潜水蒸发量与潜水埋深之间的关系

由图 1 可知, 2 种土质条件下的潜水蒸发量随潜水埋深的变化规律不同。砂姜黑土小麦各生长阶段潜水蒸发量均随潜水埋深的增大而减小, 黄潮土小麦出苗—分蘖、分蘖—越冬期潜水蒸发量随潜水埋深的增大而减小, 返青—拔节期和抽穗—成熟期潜水蒸发量随潜水埋深先增大后减小。

相同潜水埋深条件下砂姜黑土和黄潮土小麦生长期潜水蒸发量变化趋势一致, 由大到小依次为抽穗—成熟期、返青—拔节期、分蘖—越冬期、出苗—分蘖期。小麦返青前日平均气温较低, 生长缓慢, 潜水蒸发量小。返青后, 气温回升, 小麦根系发育较快, 对地下水吸收量增加, 叶面积增长, 作物蒸腾量提高, 潜水蒸发量增大。

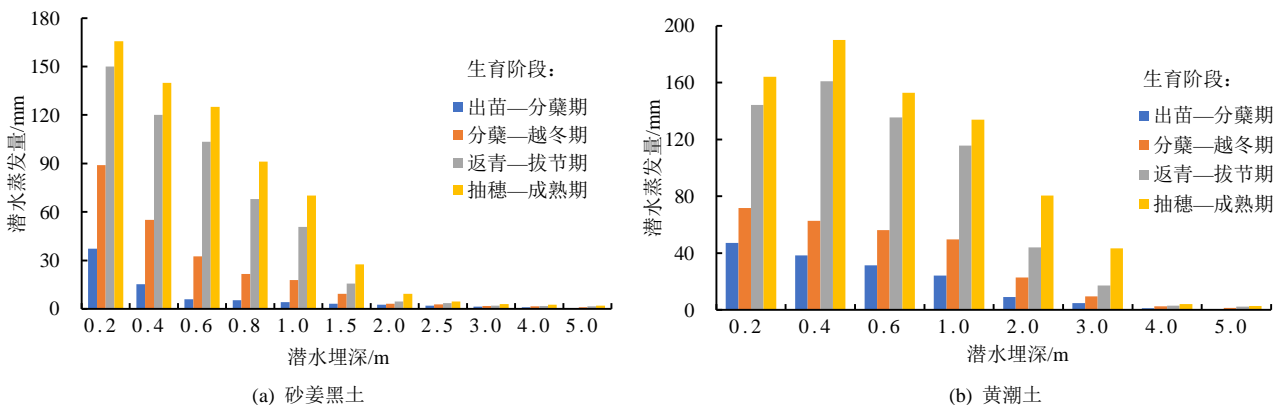


图 1 小麦各生长期不同潜水埋深下的潜水蒸发量

Fig.1 Relationship between annual phreatic evaporation and burial depth for each wheat reproductive period

### 2.4 不同土质条件下小麦潜水蒸发系数与潜水埋深之间的关系

为探究小麦在不同土质条件下的潜水蒸发系数与潜水埋深之间的关系, 选取 4 种回归函数进行非线性拟合<sup>[11-14]</sup>, 见式 (1) —式 (4):

$$\text{幂函数: } y = bx^a, \quad (1)$$

$$\text{逆函数: } y = b + \frac{a}{x}, \quad (2)$$

$$\text{对数函数: } y = b + a \ln(x), \quad (3)$$

$$\text{指数函数: } y = be^{ax}. \quad (4)$$

对小麦砂姜黑土及黄潮土日潜水蒸发系数与潜埋深进行曲线拟合，不同形式的函数曲线拟合精

表 6 小麦曲线拟合精度

Table 6 Table of accuracy of wheat curve fitting

生育阶段	函数形式	砂姜黑土		黄潮土		生育阶段	函数形式	砂姜黑土		黄潮土	
		R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE			R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
出苗—分蘖期	对数函数	0.718	0.128	0.982	0.054	分蘖—越冬期	对数函数	0.895	0.096	0.956	0.112
	逆函数	0.978	0.036	0.800	0.181		逆函数	0.965	0.055	0.574	0.238
	幂函数	0.906	0.464	0.767	0.964		幂函数	0.480	3.377	0.761	0.829
	指数函数	0.884	0.515	0.936	0.504		指数函数	0.701	2.561	0.952	0.371
返青—拔节期	对数函数	0.918	0.186	0.908	0.237	抽穗—成熟期	对数函数	0.872	0.172	0.794	0.420
	逆函数	0.785	0.301	0.610	0.478		逆函数	0.618	0.297	0.299	0.636
	幂函数	0.858	0.872	0.659	1.142		幂函数	0.665	1.219	0.518	1.567
	指数函数	0.822	0.975	0.718	1.039		指数函数	0.609	1.316	0.606	1.224

依据 R<sup>2</sup> 最大、RMSE 最小的原则，砂姜黑土小麦返青前潜水蒸发系数与潜水埋深呈逆函数关系，返青后呈对数函数关系；黄潮土小麦潜水蒸发系数与潜水

埋深呈对数函数关系。

小麦各生育阶段的曲线参数拟合结果见表 7。

表 7 小麦非线性函数曲线参数拟合

Table 7 Parameter fitting table for non-linear function curves for wheat

非线性拟合函数	参数	砂姜黑土				黄潮土			
		出苗—分蘖期	分蘖—越冬期	返青—拔节期	抽穗—成熟期	出苗—分蘖期	分蘖—越冬期	返青—拔节期	抽穗—成熟期
对数函数	a	-0.192	-0.263	-0.584	-0.421	-0.319	-0.275	-0.590	-0.502
	b	0.207	0.297	0.686	0.576	0.476	0.482	0.965	1.073
逆函数	a	0.158	0.193	0.382	0.251	0.203	0.154	0.342	0.233
	b	-0.041	-0.013	0.057	0.153	0.116	0.201	0.347	0.630
幂函数	a	-1.353	-3.048	-2.010	-1.611	-1.390	-1.175	-1.261	-1.290
	b	0.098	0.068	0.221	0.248	0.237	0.277	0.498	0.542
指数函数	a	-0.861	-2.371	-1.267	-0.993	-0.993	-0.850	-0.851	-0.974
	b	0.358	2.870	1.478	1.089	1.304	1.199	2.118	2.932

根据拟合结果，砂姜黑土小麦各生育阶段潜水蒸发系数与潜水埋深之间的关系见式（5）—式（8）。

$$\text{出苗—分蘖期: } Ec = \frac{0.158}{H} - 0.041, \quad (5)$$

$$\text{分蘖—越冬期: } Ec = \frac{0.193}{H} - 0.013, \quad (6)$$

$$\text{返青—拔节期: } Ec = 0.686 - 0.584 \ln(H), \quad (7)$$

$$\text{抽穗—成熟期: } Ec = 0.576 - 0.421 \ln(H). \quad (8)$$

黄潮土小麦各生育阶段潜水蒸发系数与潜水埋深之间的关系见式（9）—式（12）。

$$\text{出苗—分蘖期: } Ec = 0.476 - 0.319 \ln(H), \quad (9)$$

$$\text{分蘖—越冬期: } Ec = 0.482 - 0.275 \ln(H), \quad (10)$$

$$\text{返青—拔节期: } Ec = 0.965 - 0.590 \ln(H), \quad (11)$$

$$\text{抽穗—成熟期: } Ec = 1.073 - 0.502 \ln(H), \quad (12)$$

式中：Ec 为小麦潜水蒸发系数；H 为潜水埋深（m）。

将小于 0.05 mm 的日潜水蒸发量视为零蒸发，对应的潜水埋深视为小麦各生育阶段临界埋深 Z<sub>m</sub><sup>[15]</sup>。

2 种土质条件下的小麦各生育阶段 Z<sub>m</sub> 如表 8 所示。砂姜黑土小麦 Z<sub>m</sub> 介于 2.0~3.5 m，黄潮土小麦 Z<sub>m</sub> 介于 4.0~5.1 m。

表 8 不同土质条件下小麦 Z<sub>m</sub>

Table 8 Critical burial depth of wheat in different soil types

土壤质地	Z <sub>m</sub> /m			
	出苗—分蘖期	分蘖—越冬期	返青—拔节期	抽穗—成熟期
砂姜黑土	2.0	2.3	3.0	3.5
黄潮土	4.0	4.2	4.9	5.1

### 3 讨论

以往研究多集中于探究气象因子与裸地潜水蒸发量之间的关系<sup>[15-16]</sup>。本研究厘清了小麦生长条件下潜水蒸发量与不同气象因子之间的关系，得出作物生长条件下潜水蒸发现律与裸地潜水蒸发现律相似，均与气象因子之间存在显著的相关性。研究表明，砂姜黑土潜水蒸发量随潜水埋深的增加而减少，且在作物不同生育阶段的递减规律不同，黄潮土潜水蒸发量随

潜水埋深的变化规律表现为先增加后减少<sup>[17]</sup>, 与本文 2 种土质条件下的小麦生长期潜水蒸发量变化趋势相同。由于土壤质地不同, 土壤孔隙大小及连通性不同, 土壤水的运动特性也不同, 进而影响不同土壤质地的潜水蒸发规律。相同潜水埋深条件下, 砂姜黑土和黄潮土小麦生长期潜水蒸发量变化趋势一致, 从大到小依次为抽穗—成熟期、返青—拔节期、分蘖—越冬期、出苗—分蘖期, 这与杨秒等<sup>[8]</sup>研究结果一致。潜水蒸发量受作物生育期的影响, 小麦越冬后, 根系发育较快, 根深可达 1.0 m, 对土壤水分的吸收利用能力增强, 潜水蒸发量变大。不同质地土壤的极限潜水埋深不同, 黄潮土极限埋深大于砂姜黑土, 本研究根据拟合模型求得砂姜黑土  $Z_m$  介于 2.0~3.5 m, 黄潮土  $Z_m$  介于 4.0~5.1 m, 计算结果与以往研究<sup>[4]</sup>基本一致。

#### 4 结论

1) 砂姜黑土潜水蒸发量与气象因子之间的相关程度从大到小依次为: 地表温度、平均气温、水面蒸发量、日照时间、降水量、风速; 黄潮土潜水蒸发量与气象因子之间的相关程度从大到小依次为: 地表温度、日照时间、平均气温、水面蒸发量、降水量、风速。

2) 砂姜黑土小麦返青前呈逆函数关系, 返青后呈对数函数关系; 黄潮土小麦呈对数函数关系。

3) 砂姜黑土潜水蒸发量  $Z_m$  介于 2.0~3.5 m, 黄潮土潜水蒸发量  $Z_m$  介于 4.0~5.1 m。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

#### 参考文献:

- [1] 王晓红, 侯浩波. 有作物潜水蒸发规律的试验研究和理论分析(2)——有作物生长条件下的地下水利用量计算模型研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(4): 66-70, 53.  
WANG Xiaohong, HOU Haobo. Calculation model for uptake of shallow groundwater by crops[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(4): 66-70, 53.
- [2] 毛晓敏, 雷志栋, 尚松浩, 等. 作物生长条件下潜水蒸发估算的蒸发面下降折算法[J]. 灌溉排水, 1999, 18(2): 26-29.  
MAO Xiaomin, LEI Zhidong, SHANG Songhao, et al. Method of equivalent phreatic evaporation by lowering evaporation surface for estimation of the phreatic evaporation from farmland based on that from bare soil[J]. Irrigation and Drainage, 1999, 18(2): 26-29.
- [3] 孟祥军. 有植被土壤潜水蒸发的模型研究[J]. 水土保持应用技术, 2020(4): 12-14.
- [4] 王振龙, 刘淼, 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.  
WANG Zhenlong, LIU Miao, LI Rui. Experiment on phreatic evaporation of bare soil and soil with crop in Huaibei Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,

- 25(6): 26-32.
- [5] 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.  
HAO Zhenchun, CHEN Xi, WANG Jiahu, et al. Trend and impact factors of evaporation from shallow phreatic groundwater of bare soil on Huaibei Plain in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(6): 73-78.
- [6] 尚松浩, 毛晓敏. 潜水蒸发研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(4): 85-89, 94.  
SHANG Songhao, MAO Xiaomin. Research progress on evaporation from phreatic water[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(4): 85-89, 94.
- [7] 郑春成. 潜水蒸发研究进展[J]. 农业与技术, 2011, 31(4): 98-102.
- [8] 杨秒, 王振龙, 吕海深, 等. 淮北平原小麦和大豆生长条件下潜水蒸发实验模拟[J]. 水文, 2019, 39(4): 63-67.  
YANG Miao, WANG Zhenlong, LYU Haishen, et al. Simulation of phreatic evaporation in wheat and soybean during growth period in Huaibei Plain[J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(4): 63-67.
- [9] 程先军. 有作物生长影响和无作物时潜水蒸发关系的研究[J]. 水利学报, 1993, 24(6): 37-42.
- [10] 孔凡哲, 王晓赞. 有作物条件下潜水蒸发计算方法的实验研究[J]. 中国农村水利水电, 2002(3): 3-5.  
KONG Fanzhe, WANG Xiaozan. A study on the calculation method of evaporation from groundwater in seasons of crops[J]. China Rural Water and Hydropower, 2002(3): 3-5.
- [11] 张学英. 潜水蒸发与土质及地下水埋深关系[J]. 地下水, 2002, 24(1): 8-9.
- [12] 苏浩, 单丽. 辽宁中部平原区潜水蒸发影响因素及变化规律[J]. 东北水利水电, 2007, 25(9): 32-34, 72.  
SU Hao, SHAN Li. Influence factor of phreatic water and variation law in centre plain of Liaoning Province[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2007, 25(9): 32-34, 72.
- [13] 王怡宁, 丁佳楠, 吕海深, 等. 基于水面蒸发量及气温因子的潜水蒸发量计算模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(3): 69-74.  
WANG Yining, DING Jianan, LYU Haishen, et al. Estimating shallow groundwater evaporation based on surface evaporation and ambient air temperature[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(3): 69-74.
- [14] 周超, 王振龙. 砂姜黑土区有无作物生长潜水蒸发规律模拟实验[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(24): 81-83.
- [15] 丁佳楠, 王振龙, 吕海深, 等. 基于气象要素和潜水埋深的裸地潜水蒸发计算模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 125-130.  
DING Jia'nan, WANG Zhenlong, LYU Haishen, et al. Calculating groundwater evaporation based on meteorological data and groundwater table depth[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 125-130.
- [16] 许莹莹, 李薇, 王振龙, 等. 基于主成分分析的裸地潜水蒸发与气象要素关系模拟[J]. 水文, 2020, 40(4): 7-13, 39.  
XU Yingying, LI Wei, WANG Zhenlong, et al. Simulation of relationship between evaporation and meteorological elements of bare ground diving based on principal component analysis[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(4): 7-13, 39.
- [17] 刘路广, 崔远来, 冯跃华. 引黄灌区潜水蒸发规律与计算方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 18-22, 33.  
LIU Luguang, CUI Yuanlai, FENG Yuehua. Change law and calculation method of phreatic evaporation in the Yellow River irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 18-22, 33.

weighting. **【Result】** As the times of cutting increased, the height, stem diameter and yield of the alfalfa decreased, while its crude protein content increased. As time elapsed following the third and fourth cutting, the water consumption decreased first followed by an increase. The total water consumption during the two stages varied with irrigation method, and their significance was ranked in the order of  $W1 < W2 < W3$ ; their associated water and irrigation water use efficiency was ranked in the order of  $W1 > W2 > W3$ . Both shallow drip irrigation and sprinkler irrigation effectively improved plant quality. Fuzzy comprehensive evaluation indicated that, overall, the shallow drip irrigation was optimal for growth, water consumption, yield and quality of the crop. **【Conclusion】** The shallow buried drip irrigation not only saved water but also improved yield and quality of the alfalfa. It is hence most suitable for alfalfa cultivation in the arid and water-scarce regions in the northwest of China.

**Key words:** alfalfa; irrigation method; fuzzy comprehensive evaluation; yields; quality

责任编辑: 韩洋

(上接第 23 页)

## Study of Factors Affecting Wheat Growth-stage Evapotranspiration under Various Edaphic Conditions

XU Rongyan<sup>1</sup>, DAI Lina<sup>2</sup>, FU Guosheng<sup>3</sup>, JIANG Peng<sup>1</sup>, DING Yutong<sup>1</sup>,  
ZHANG Meina<sup>1</sup>, WANG Wanwan<sup>4</sup>, WANG Zhenlong<sup>5\*</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Bureau of Hydrology, Huaihui Commission (Information Center), Bengbu 233022, China; 3. Taizhou Branch, Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Taizhou 225317, China; 4. Hebei Engineering University, Handan 056021, China; 5. Wudaogou Hydrology Experimental Station, Institute of Water Resources Science, Anhui Province (Huaihui Commission, Ministry of Water Resources), Bengbu 233000, China)

**Abstract:** **【Objective】** The ascent of groundwater into the vadose zone and its ultimate evaporation into atmosphere is an important hydrological process. This paper investigates the impact of meteorological factors and soil texture on evaporation of shallow groundwater under different depths from winter wheat in a sandy ginger black soil and a yellow tide soil. **【Method】** The study was based on data measured from 2010 to 2022 from the Wudaogou experimental station. The relationship between groundwater evaporation and seven meteorological factors was analyzed using correlation analysis and function fitting technique. A multiple regression model, along with a nonlinear fitting function, was developed to calculate the change in evaporation of shallow groundwater with its depth ranging from 0.2 to 5.0 m. **【Result】** ① In the sandy ginger black soil, the significance of the impact of meteorological factors on groundwater evaporation was ranked in the order of surface temperature > average air temperature > surface evaporation > duration of sunshine > precipitation > wind speed; in the yellow tide soil, the ranking order was surface temperature > duration of sunshine > average air temperature > surface water evaporation > precipitation > wind speed. ② The multiple regression model is accurate for estimating evaporation of shallow groundwater at different depths, with  $R^2 > 0.75$  for the sandy ginger black soil and  $R^2 > 0.70$  for the yellow tide soil. ③ The relationship between groundwater evaporation and groundwater depth for the sandy ginger black soil followed an inverse function with  $R^2 > 0.95$  before the greening stage and a logarithmic function after the greening stage with  $R^2 > 0.85$ . In contrast, in the yellow tide soil, it followed a logarithmic function with  $R^2 > 0.75$ . ④ Depending on the growing season, the critical groundwater depth for evaporation ranged from 2.0 to 3.5 m for the sandy ginger black soil, and from 4.0 to 5.1 m for the yellow tide soil. **【Conclusion】** Groundwater evaporation depends not only on meteorological factors but also on soil texture and growing season of the winter wheat. The proposed models are accurate for estimating their relationships.

**Key words:** phreatic evaporation; meteorological factors; burial depth; wheat; Huaibei Plain

责任编辑: 韩洋