

湿润灌溉条件下水稻田土壤水分时空分布及预测模型研究

赵江辉

太仓市水利工程质量与安全监督站, 江苏 太仓

收稿日期: 2025年10月30日; 录用日期: 2025年12月23日; 发布日期: 2025年12月29日

摘要

以实地观测为基础, 在湿润灌溉条件下分析研究了拔节孕穗期、抽穗开花期及乳熟期等三个主要需水阶段水稻田土壤水分空间分布及影响因素, 并建立了土壤水分预测模型。结果表明, 在作物有效根系层0~40 cm内, 中稻稻田土壤水分时空分布存在显著差别。相关分析及显著性检验结果显示, 土壤含水率对田间气温及地下水埋深响应较为敏感, 对相对湿度及风速响应次之, 对气压响应最弱。回归及误差分析结果也表明, 对主要气象因子及地下水埋深等回归建立的多元线性模型, 最大测量误差分别为2.92%、4.73%和4.85%, 拟合效果满意。研究成果为湿润灌溉条件下水稻田土壤水分预测奠定了基础, 也为节水灌溉制度的科学制定提供了理论依据。

关键词

水稻田, 湿润灌溉, 土壤水分, 时空分布, 预测, 小气候条件

Study on Time-Space Distribution and Prediction Models of Soil Moisture in Paddy Fields under the Wetting Irrigation

Jianghui Zhao

Water Conservancy Project Quality and Safety Supervision Station of Taicang City, Taicang Jiangsu

Received: October 30, 2025; accepted: December 23, 2025; published: December 29, 2025

Abstract

Based on field test, the article analyzed the time-space distribution and influence factors of paddy

soil moisture at three main growth stages (including jointing booting, heading to flowering, milk stage), and prediction models of soil water were established. The results showed that temporal and spatial distribution of soil moisture in semilate rice paddy was significantly different in 0~40 cm root zone. The results suggested the response of soil moisture content to temperature in the field and water table were sensitive, to relative humidity and wind took second place, and to atmospheric pressure was the worst. Multi-regression analysis and error analysis also showed that the multi-linear regression models of soil water established based on major meteorological factors and water table at the three different growth stages were satisfying, and the maximum relative errors are 2.92%, 4.73% and 4.85% respectively. The research can lay a foundation for forecasting of paddy soil water under the wetting irrigation, and supply a theory basis for water-saving irrigation program.

Keywords

Paddy, Wetting Irrigation, Soil Moisture, Temporal and Spatial Distribution, Forecasting, Microclimate Conditions

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湿润灌溉，是使稻田土壤水分接近饱和而不形成水层的灌水方式。研究表明，湿润灌溉比大水漫灌节水 67%，比“浅晒浅湿”灌溉节水 45%，可提产 8%，节能 30% [1]。灌溉可调整土壤中的水、肥、气、热等环境参数，而土壤墒情对作物生长有着显著的影响。Helms TC 等研究表明，适宜土壤水分是作物生长良好的重要。

环境参数，不适宜的土壤水分环境将明显延迟作物的生长，特别在作物发芽和幼苗生长阶段[2] [3]。土壤含水率是决定作物产量的最重要因素之一，及时掌握土壤含水率情况，可知作物的水分供应是否正常。此外，土壤含水率也是气象学、土壤学、水文学、生态学等领域所关注和研究的重要内容[4] [5]。环境因子及土壤水分条件的改变使水稻生理特性和需水规律产生复杂的连锁反应，并因此影响作物产量[6]。

土壤水分时空变异是由多重尺度上的土地利用(植被)、气象(降雨)、地形、土壤、人为活动等因子综合作用的结果[7] [8]。湿润灌溉条件下，田间小气候条件及地下水埋深等环境条件对不同时空尺度下水稻田土壤水分的影响研究尚属空白。为此，本文分析湿润灌溉条件下水稻田土壤水分时空分布状况，研究田间小气候条件、地下水埋深等环境条件对水稻田土壤水分动态变化的影响，利用相关分析和多元线性回归分析法，分析影响土壤含水率的主因子，建立不同时空尺度下土壤水分预测模型，为农业节水灌溉及土壤水分管理提供充实的理论依据。

2. 试验区概况

试验区位于 2009 年南方渠灌节水改造技术集成模式示范区，坐落在江苏省扬州市高邮市卸甲镇周庄村(东经 119°24'~119°39'、北纬 32°35'~33°06')，以粘土为主。该地滨江临海，属北亚热带季风湿润气候区，具有四季分明、气候温和、雨量充沛、阳光充足、无霜期长及寒暑变化显著等特点。年平均气温为 14.6℃，日均气温不小于 0℃ 的日数为 325 d/a；多年平均日照时数为 2207.92 h，无霜期为 221.7 d，降水量为 984.9 mm，降水日数为 112 d，蒸发量为 895 mm；夏季多东南风和东风，冬季多西北、东北风[9]。

3. 研究方法

湿润灌溉条件下(通过高标准农渠灌溉使田间土壤水分接近饱和且不形成明显水层),跟踪监测试验区气象因子、地下水埋深等环境条件,测试研究不同时空尺度下土壤含水率的动态变化规律。试验区面积 0.255 公顷,供试稻田为中粳稻稻田。

3.1. 土壤含水率测定

采用烘干法测定不同生育阶段水稻根系层土壤含水率(重量%)。水稻有效根系层最大深度取 40 cm,划分 4 个层次,每层 10 cm,逐日观测,重复 4 次取均值。若土壤饱和时,则利用频域反射仪(FDR,英国 Delta-T 公司生产,PR1 型)进行测量,即为土壤饱和含水率,同样重复 4 次[9]。

3.2. 小气候条件监测

田间小气候条件,包括田间气温、相对湿度、风速等,利用东西仪(北京)科技有限公司生产的型号为 BO8HOB0 的小型自动气象站(小气候观测仪)进行监测。该观测仪居中布置在试验区临路侧,场地平整,安装高度 2 m,周边无遮挡。气象因子取白天(AM6:00~PM18:00)监测数据均值[9]。

3.3. 地下水埋深测量

为减小局部偏差,确保样本普适性,在试验小区内选取三处代表性位置,采用 S 形法布设水位观测井,取每日下午 6 时三处观测数据均值作为地下水埋深值。

4. 结果与分析

2009 年 8 月至 9 月,在湿润灌溉条件下,实测了水稻拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期等三个主要需水阶段稻田土壤重量含水率。

4.1. 不同生育期土壤水分空间分布

图 1 给出了不同生育阶段稻田湿润灌溉条件下作物有效根系层土壤平均重量含水率空间分布差异状况。从图中可以看出,作物有效根系层 0~40 cm 内,不同生育阶段前、中、后期 0~10 cm 表层土壤平均重量含水率的空间分布有明显的差别,而在 10~40 cm 土层,抽穗开花期的土壤平均重量含水率空间分布差别最小,这与田间多变的小气候条件及地下水位有一定的相关性。从整个试验观测期(阶段 IV)来看,在栽有中粳水稻田的作物有效根系层内,土壤平均重量含水率不同时空分布仍存在差异,但相对较小。特别 30~40 cm 土层,土壤水分时空分布变异性最小,也就意味着相应空间土壤水分的分布均匀性最高。

4.2. 土壤含水率对环境条件的响应

4.2.1. 土壤含水率对气象因子的响应

气象因子对土壤水分的影响是一个复杂过程[10]。不同时空尺度下土壤含水率对气象因子的响应存在显著性差异。结果(表 1)显示,稻田土壤含水率在拔节孕穗及乳熟期与田间气温呈极显著负相关,响应较为敏感,而抽穗开花期呈显著或极显著正相关,可能是气温过高时,叶片过度失水,气孔关闭,使蒸腾减弱的缘故;与气压相关性不显著(拔节孕穗期呈负相关,抽穗开花及乳熟期呈正相关);与相对湿度(呈正相关)及风速(呈负相关)都存在一定的相关性,有些土层表现显著或极显著,有些土层表现不显著。

4.2.2. 土壤含水率对地下水埋深的响应

地下水埋深对表层及主要根系层土壤水分有一定影响性[11]-[13]。相关分析及显著性检验结果(表 1)表明,土壤含水率与地下水埋深呈显著或极显著负相关,且拔节孕穗期的相关性明显高于其它两阶段。

同时还可看出地下水埋深对 20~40 cm 土层范围内土壤含水率的响应比 0~20 cm 土层范围内的敏感性要强,这也与前人的研究结果相符[11]。

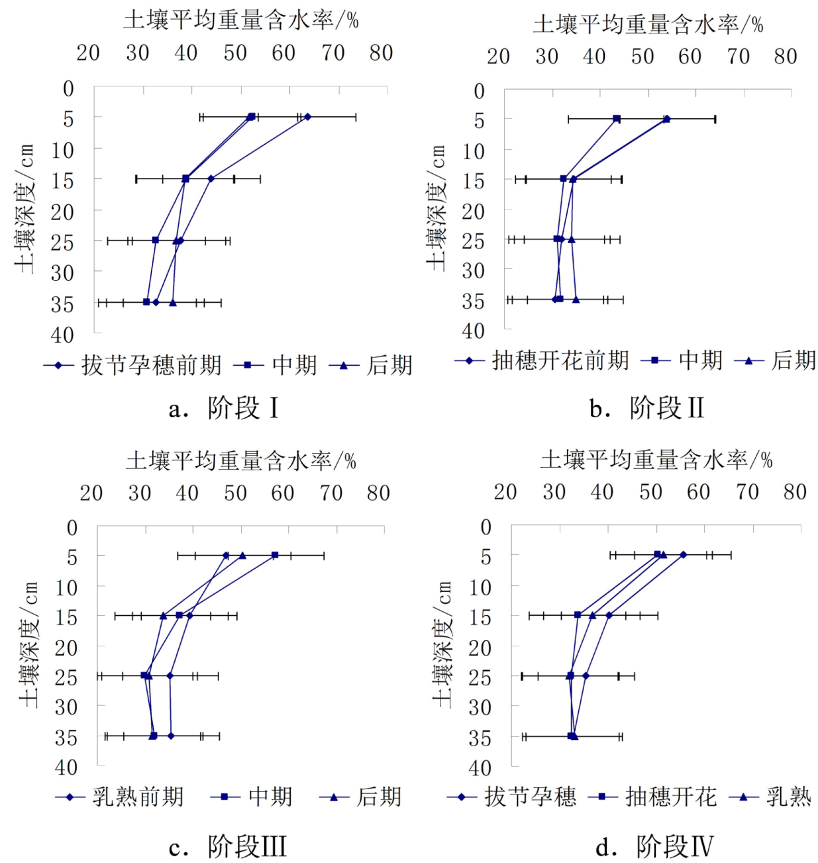


Figure 1. Spatial distribution of soil moisture content at each measuring point in paddy field at different growth stages
图 1. 不同生育期水稻田各测点土壤含水率空间分布状况

Table 1. Correlation coefficient between soil water content and environmental factors in paddy field
表 1. 水稻田土壤含水率与环境因子的相关系数

生育阶段	土层/cm	相关系数				
		气温	气压	相对湿度	风速	地下水埋深
拔节孕穗	0~20	-0.603**	-0.284	0.041	-0.672**	-0.917**
	20~40	-0.543**	-0.373	0.322*	-0.343	-0.974**
	0~40	-0.588**	-0.400	0.239	-0.323	-0.981**
抽穗开花	0~20	0.544**	0.243	0.433*	-0.507*	-0.642**
	20~40	0.227*	0.279	0.432*	-0.060	-0.765**
	0~40	0.487**	0.054	0.688**	-0.487*	-0.664**
乳熟	0~20	-0.502**	0.375	0.127	-0.731**	-0.359*
	20~40	-0.633**	0.324	0.660**	-0.468*	-0.559**
	0~40	-0.742**	0.435	0.587**	-0.732**	-0.612*

**表示相关性极显著 $P \leq 0.01$, *表示相关性显著 $0.01 < P \leq 0.05$ 。

综上, 不同时空尺度下土壤含水率对气温及地下水埋深响应较为敏感, 对风速和相对湿度也有一定响应, 而对气压响应微弱。不同生育阶段不同土层土壤水分对上述环境因子响应的敏感程度有所差别, 土壤水分受环境因子的影响不是单一、孤立的, 而是环境因子综合作用的结果。

4.3. 土壤含水率与环境因子的回归分析

水稻田土壤含水率与影响因子之间的多元线性回归结果(表 2)表明, 不同生育期不同土层的土壤含水率与影响因子间的相关性极显著($P \leq 0.01$), 除了田间气压没有进入方程式外, 其它影响因子都进入了方程式。气压没有进入方程式, 可能是土壤含水率对气压不敏感的缘故, 这也与相关分析的结果基本吻合。

Table 2. Regression analysis results of soil moisture content and environmental factors in paddy fields

表 2. 水稻田土壤含水率与环境因子的回归分析结果

生育阶段	土层/cm	多元线性回归模型	相关系数
拔节孕穗	0~20	$\theta_m = 66.28 - 0.057T_a - 0.108\psi - 1.412v - 0.241h$	0.985**
	20~40	$\theta_m = 7.51 + 0.473T_a + 0.181\psi + 0.682v - 0.149h$	0.966**
	0~40	$\theta_m = 36.36 + 0.210T_a + 0.041\psi - 0.259v - 0.198h$	0.982**
抽穗开花	0~20	$\theta_m = -3.03 + 0.704T_a + 0.408\psi - 0.350v - 0.057h$	0.943**
	20~40	$\theta_m = 21.93 + 0.141T_a + 0.100\psi - 0.371v - 0.035h$	0.917**
	0~40	$\theta_m = 9.45 + 0.423T_a + 0.253\psi - 0.361v - 0.046h$	0.973**
乳熟	0~20	$\theta_m = 78.80 - 1.179T_a + 0.031\psi - 2.845v + 0.080h$	0.875**
	20~40	$\theta_m = -0.767 + 0.400T_a + 0.399\psi - 0.036v - 0.197h$	0.937**
	0~40	$\theta_m = 40.14 - 0.148T_a + 0.129\psi - 1.849v - 0.079h$	0.910**

* θ_m : 土壤含水率(重量%); T_a : 气温($^{\circ}\text{C}$); ψ : 相对湿度(%); v : 风速(m/s); n : 样本数; **号表示相关性极显著 $P \leq 0.01$ 。

4.4. 误差分析

Table 3. Measurement error analysis of soil moisture content in canal irrigation paddy field at different growth stages

表 3. 不同生育阶段渠灌水稻田土壤含水率测量误差分析

生育阶段	土层/cm	实测值/ (重量%)	计算值/ (重量%)	相对误差 /%	土层/cm	实测值/ (重量%)	计算值/ (重量%)	相对误差 /%	土层/cm	实测值/ (重量%)	计算值/ (重量%)	相对误差 /%
拔节孕穗		51.95	52.33	-0.73		34.73	34.03	2.03		42.91	43.46	-1.29
		48.07	48.58	-1.05		35.28	35.17	0.30		39.48	39.95	-1.18
		42.15	41.11	2.46		30.54	29.65	2.92		36.34	35.41	2.58
抽穗开花		44.84	44.43	0.91		30.79	31.20	-1.35		38.51	38.33	0.47
	0~20	41.92	41.32	1.43	20~40	30.07	30.01	0.18	0~40	37.81	37.76	0.13
		39.34	41.20	-4.73		29.45	29.70	-0.84		36.83	36.39	1.19
乳熟		50.78	48.70	4.09		30.19	31.49	-4.31		36.59	37.89	-3.57
		43.77	41.65	4.85		31.19	30.00	3.83		35.65	37.16	-4.22
		40.63	41.31	-1.68		33.40	34.50	-3.30		45.08	45.46	-0.85

为检验预测模型的测量精度, 本文采用 2010 年 8、9 月份在高邮灌区内采集的观测数据对模型进行

误差分析。水稻田土壤含水率实测值采用烘干法测定, 计算公式为 $\theta_m = m_w/m_s \times 100\%$, 式中 m_w 为土样中水分的质量, g; m_s 为土样烘干后的质量, g。计算值则采用土壤含水率预测模型(回归模型)进行计算。不同生育阶段不同土层稻田土壤含水率测量误差分析见表 3。分析结果表明, 拔节孕穗、抽穗开花及乳熟 3 个生育阶段土壤含水率测量误差均小于 5%, 最大误差为 4.85%。

5. 结论与讨论

(1) 湿润灌溉条件下, 水稻田土壤水分时空分布状况研究表明, 作物有效根系层 0~40 cm 内, 不同生育阶段前、中、后期的土壤水分空间分布存在显著差别, 但从整个试验观测期来看, 30~40 cm 土层, 土壤水分时空分布差别相对较小。

(2) 相关分析及显著性检验结果表明, 不同时空尺度下土壤含水率对田间小气候因子中的气温响应较敏感, 对风速及相对湿度响应次敏感, 对气压响应最差; 土壤含水率与地下水埋深之间存在极显著或显著的相关性。地下水通过影响土壤含水量分布间接影响植物根系分布及生长, 从而影响植物地上部分生物产量和水分利用效率[14], 拔节孕穗期水稻需水量最大, 地下水埋置越深, 根系层土壤含水率越小。

(3) 通过回归分析建立起来的湿润灌溉条件下水稻田土壤含水率预测模型(数学模型), 最大测量误差为 4.85%, 拟合效果满意, 可用该模型做简化替代计算, 具有实际应用意义。同时可为制定合理的优化灌溉制度提供科学理论依据, 也为湿润灌溉条件下水稻田土壤水分预测提供一种新方法。该预测模型在不同土壤、不同气候、不同品种等条件下的适用性需进一步验证, 同时对于节水期限的划分和节水界限的控制, 不同土壤、气候条件下是不同的, 也需进一步研究。

参考文献

- [1] 王成才, 李福欣. 水稻湿润灌溉技术及其节水增产机理的分析[J]. 黑龙江水专学报, 2003, 30(1): 59-60.
- [2] Helms, T.C., Deckard, E.L., Goos, R.J. and Enz, J.W. (1996) Soil Moisture, Temperature, and Drying Influence on Soybean Emergence. *Agronomy Journal*, **88**, 662-667. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800040027x>
- [3] 王建东, 龚时宏, 隋娟, 等. 华北地区滴灌灌水频率对春玉米生长和农田土壤水热分布的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 39-45.
- [4] 张智韬, 李援农, 杨江涛, 等. 遥感监测土壤含水率模型及精度分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 152-156.
- [5] 张成才, 吴泽宁. 遥感计算土壤含水量方法的比较研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 69-72.
- [6] 陈家宙, 陈明亮, 何圆球. 土壤水分状况及环境条件对水稻蒸腾的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 63-67.
- [7] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 100-107.
- [8] 孙建华, 刘建军, 康博文, 等. 陕北毛乌素沙地土壤水分时空变异规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 224-227.
- [9] 赵江辉, 蔡守华, 杨延伟. 田面无水层条件下渠灌稻田土壤水分影响因素及预测模型研究[J]. 节水灌溉, 2010(11): 40-42.
- [10] 陈顺伟, 蒋妙定, 罗士元, 等. 沿海基岩海岸不同林分土壤含水率与气象因子的相关分析[J]. 浙江林业科技, 1995, 15(6): 22-27.
- [11] 巴比江, 郑大玮, 卡热玛·哈木提, 等. 地下水埋深对春玉米田土壤水分及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 57-60, 65.
- [12] Kruse, E.G., Champion, D.F., Cuevas, D.L., Yoder, R.E. and Young, D. (1993) Crop Water Use from Shallow, Saline Water Tables. *Transactions of the ASAE*, **36**, 697-707. <https://doi.org/10.13031/2013.28388>
- [13] Mejia, M.N., Madramootoo, C.A. and Broughton, R.S. (2000) Influence of Water Table Management on Corn and Soybean Yields. *Agricultural Water Management*, **46**, 73-89. [https://doi.org/10.1016/s0378-3774\(99\)00109-2](https://doi.org/10.1016/s0378-3774(99)00109-2)
- [14] 张志强, 王盛萍, 贾宝全, 等. 甘肃民勤地区不同地下水埋深花棒蒸腾耗水研究[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 736-742.