

皖北杨楼流域玉米农田土壤水变化特征 及驱动因子研究

杜明成^{1,2,3}, 张建云^{1,2,3}, 王振龙⁴, 刘翠善^{2,3}, 王国庆^{2,3}

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 南京水利科学研究院水文水资源与
水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098;

4. 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 为研究皖北平原北部黄潮土在玉米不同生长期内土壤水分变化特征, 选取杨楼流域为研究对象, 利用2010–2018年0~50 cm深度土壤水数据, 结合同期地下水埋深、前期无降雨日数、水面蒸发和降雨量进行相关性分析, 利用增强回归分析算法确定不同驱动因子对土壤水变化的相对贡献。结果表明: 在玉米整个生长期, 随着土层深度的增加, 土壤含水率减小。按变异系数可划分为2个典型土层, 即活跃层(深度0~10 cm)和次活跃层(深度10~50 cm)。土壤水与水面蒸发、地下水埋深和前期无降雨日数呈显著负相关, 与降雨量呈显著正相关关系。前期无降雨日数对土壤含水率的相对贡献率最大, 为42.6%, 其次是地下水埋深, 为20.9%, 作物生长期对土壤含水率的相对贡献率最小, 为7.3%。该研究对了解土壤水分变化、农业水管理及水分利用率等有重要意义。

关键词: 土壤水; 黄潮土; 增强回归树; 夏玉米; 生长期

中图分类号: S152.7; TV93

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)01-0206-09

Soil moisture content change characteristics and driving factors of maize farmland in the Yanglou Watershed, northern Anhui Province

DU Mingcheng^{1,2,3}, ZHANG Jianyun^{1,2,3}, WANG Zhenlong⁴, LIU Cuishan^{2,3}, WANG Guoqing^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research

Institute, Nanjing 210029, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China;

4. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Bengbu 233000, China)

Abstract: To study the characteristics of soil moisture changes of yellow fluvo-aquic soils in the northern Anhui North Plain during different growing periods of maize, the Yanglou Watershed was selected as the study object, and correlation analysis of groundwater table, the number of days without rainfall in the previous period, evaporation from water surface and rainfall was conducted using 0~50 cm soil water content data from 2010–2018, and the relative contribution of different driving factors to soil water content were calculated using boosted regression tree algorithm. The results showed that the soil water content decreased with the increase of the soil depth throughout the maize growing season. Two typical soil layers could be classified according to the coefficient of variation, with 0~10 cm as the active layer and 10~50 cm as the less active layer. Soil water content showed a significant negative correlation with water surface evaporation, groundwater table and the number of days without rainfall in the previous period, but a significant positive correlation with the rainfall. The relative contribution of the number of days without rainfall in the previous period to soil water content was the largest, which accounted for 42.6%, followed by the groundwater table, which was 20.9%, and the crop growing period only contributed 7.3%, which

收稿日期:2021-07-14; 修回日期:2021-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41830863、52121006); 国家重点研发计划项目(2017YFA0605002、2017YFC0404602);
水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2019nkzd02、
2020nkzd01)

作者简介:杜明成(1995–),男,安徽萧县人,博士研究生,主要从事水文模拟实验研究。

通讯作者:王国庆(1971–),男,山东成武人,博士,教授级高级工程师,主要从事气候变化对水文水资源影响方面的研究。

was the smallest. This study can shed some light on the understanding of soil moisture changes, agricultural water management and water utilization.

Key words: soil moisture content; yellow fluvo-aquic soil; boosted regression tree; summer maize; growing period

1 研究背景

土壤水是与水文、生态和植被生长过程等有关的重要参数^[1]。它作为碳循环和水文循环过程中的关键变量,影响着入渗、蒸发及作物生长^[2-3]。但由于土壤水具有高度的时空变异性,受到很多因素的影响,如气象条件、植被类型和地下水埋深等,但其主要控制因素因时因地而异,一直以来是水量平衡和水文循环过程研究的难点^[4-5]。邱扬等^[6]认为土壤含水率随深度的增加而增加,但空间变异性从15 cm开始增加,0~5 cm深度土壤水分的空间变异性主要受降雨和土地利用方式相互作用的影响。韩湘云等^[7]认为控制不同月份土壤水变化的因素不同,降水和相对湿度为5、6月的主要控制因子,气温和日照时数为7、8月的主要控制因子。在不同的植被覆盖或土地利用方式下,土壤水表现出不同的变化规律^[8]。种植玉米时,土壤水与绝对湿度、地下水埋深有很大的相关性^[9]。种植小麦时,土壤水与地下水埋深、日照时数及气温有很大的相关性,在不同的生长期均表现出不同的性质^[10]。上述研究定性得出不同因素对土壤水的影响,但很少有学者定量分析不同影响因素对土壤含水率的相对贡献率。

因此,本文以皖北平原北部——杨楼水文实验站为研究对象,研究该地区不同因素对土壤水分的影响,然后使用增强回归分析定量研究不同因素对土壤水的相对贡献率。研究区土壤类型为典型的黄泛沙土(黄潮土),之前有学者分析气象因素与皖北平原南部砂姜黑土区土壤水的相关性^[9],但对皖北平原北部黄潮土区的研究较少。另外,黄潮土和砂姜黑土具有不同的性质。降雨时期,黄潮土易板结,在一定程度上阻碍了土壤水的垂向运移,但它具有很好的保肥保墒能力;而砂姜黑土遇水膨胀,干旱时土壤收缩开裂,导致土壤保肥保墒能力差,限制了农作物的生长。研究黄潮土区农田土壤水变化特征及影响因素,对完善皖北平原农田土壤水变化规律的研究有一定意义,同时可为改善砂姜黑土保肥保墒能力提供参考。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

研究区位于皖北平原北部的宿州市萧县杨楼镇

杨楼流域内(图1),该流域位于116°35′~116°50′E,34°19′~34°26′N,流域内坡降约为1/5000,集水面积约为152 km²^[11]。多年平均降雨量为750 mm,降雨主要集中在6~9月。杨楼农田土壤类型为黄潮土,占皖北平原总面积的33%。主要是玉米和小麦轮作,播种玉米的时间多在6月中旬,收割期在9月底或10月初。

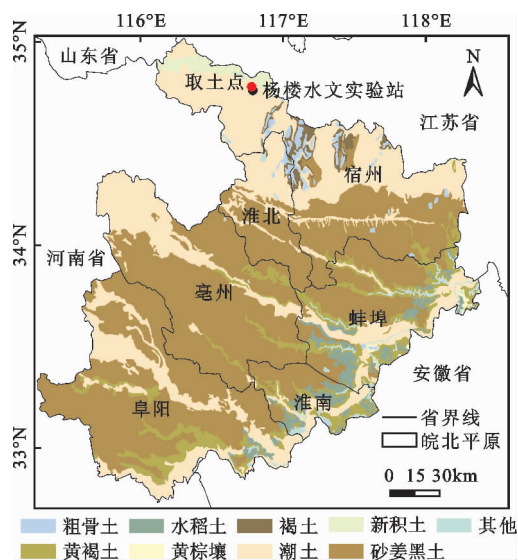


图1 皖北平原土壤类型分布及站点位置

2.2 材料及数据选取

选择2010~2018年夏玉米生长期6~10月为观测期,测试0~50 cm土层深度大田土壤水数据进行分析。取土地点在萧县杨楼镇小吴村北(116°49′E,34°21′N),土壤类型为黄潮土(按照国际制标准划分,取样点土壤颗粒级配为:黏粒占2%,粉粒占11.5%,砂粒占86.5%,土壤质地为壤质砂土^[12])。土样放入铝盒带回实验站,称完土壤鲜重后放在105℃烘箱内烘干,计算0~10、10~20、20~30、30~40和40~50 cm土层深度的平均质量含水率。土壤样品每隔10 d取一次,雨季增加取样频率。地下水埋深采用大田水井观测数据。本文中,降雨量和蒸发量数据为10 d累积值(降雨量通过中国标准雨量筒测量,蒸发量为实验站内E601测量的水面蒸发量),前期无降雨日数指测量土壤水前的无降雨日数。

2.3 增强回归分析

本文采用增强回归分析(boosted regression

tree, BRT) 算法量化不同影响因素对土壤含水率的影响。该算法是一种机器学习算法, 是回归树与 Boosting 算法的组合。基于树的拟合模型将所有数据拟合到观测值, 通过该模型先识别建模效果较差的观测值, 然后添加新树改善建模效果, 其中训练集 70% 的数据用于构建模型, 30% 的数据用于验证模型的偏差, 直到预测值和观测值之间的差异达到最小, 选择最优的拟合参数^[13-15]。在运算时, 预测变量之间的相对重要性是根据该变量被选择在树中分裂的次数来计算的, 然后对整个基于树的模型进行平方改进, 加权确定最终贡献率^[16]。该模型的优点是提高了计算结果的稳定性和精确度, 被广泛应用在不同的科学领域^[14, 17]。

虽然 BRT 算法对预测多重非共线性变量的效果较好, 但如果预测变量和影响因素有较高的自相关关系, 可能会出现过拟合现象, 影响 BRT 算法的预测效果^[18]。为了解决这个问题, 在运行 BRT 算法之前, 根据 Pearson 相关系数 ($|r_p| < 0.7$) 和方差膨胀因子 ($VIF < 10$) 分析预测变量与响应变量之间的多重共线性^[16]。BRT 算法采用一种 10 倍

交叉验证法, 用于建立和评估模型的性能。具体来说, 将数据随机划分为 10 个子集, 使用其中 9 个子集构建模型, 1 个子集用于测试模型性能^[14]。

2.4 数据分析

变异系数 (C_v) 的大小揭示了土壤水分空间变化的特征^[19], 当 $C_v \leq 10\%$ 时, 属于弱变异; 当 $10\% < C_v < 100\%$ 时, 属于中等变异; 当 $C_v \geq 100\%$ 时, 属于强变异。 C_v 计算公式如下:

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: n 为样本数量; x_i 为第 i 个土壤含水率, $\bar{x}$ 为土壤含水率均值。

3 结果与分析

3.1 土壤含水率变化特征

2010-2018 年观测期研究区不同深度土壤含水率随时间变化箱线图以及平均土壤含水率时空分布分别见图 2、3。

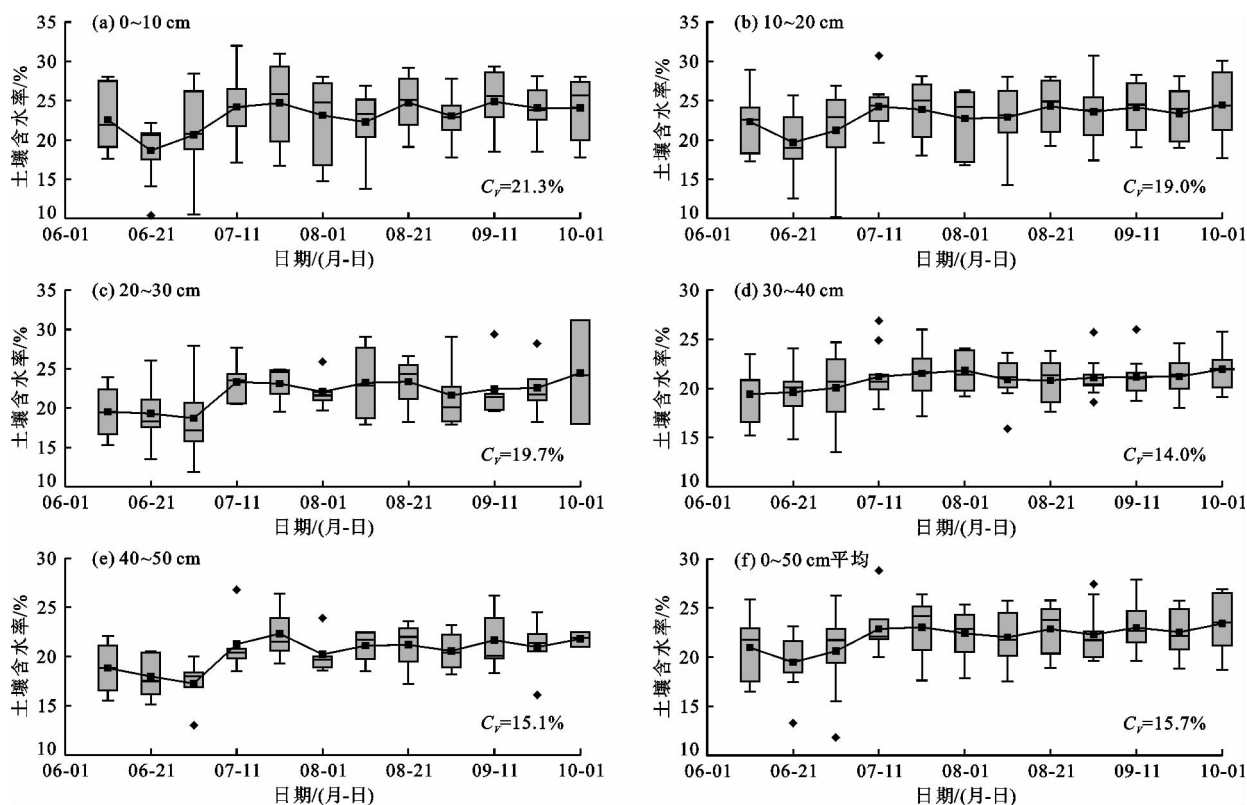


图2 2010-2018年观测期研究区不同深度土壤含水率随时间变化箱线图

由图 2 可知, 观测期内 0~10 cm 土层深度的土壤含水率变化区间在 10.5~32.0% 之间, 在各土层中变异系数 C_v 值最大, 为 21.3%; 20~50 cm 土层

深度的土壤平均含水率变异系数 C_v 在 10%~20% 之间, 分别为 19.0%、19.7%、14.0% 和 15.1%, 因而该地区土壤含水率变异系数范围为 $10\% < C_v <$

100%,整体属于中等程度变异。另外,将不同深度土壤含水率变异系数 C_v 的大小与之前学者的研究成果对比发现^[20-22],该地区0~10 cm土壤水分为活跃层,而10~50 cm土壤水分为次活跃层。主要是由于种植玉米期间是该地区的雨季,表层土壤水受降雨的补给使其含水量高、变化幅度大,另外,黄潮土遇水板结,导致入渗率降低^[23],对下层的土壤水补给少,从而使下层土壤含水率低且波动幅度小。而玉米生长需要大量的水分,根系在土壤内部吸水造成土壤含水率随土壤深度的增加而减小。

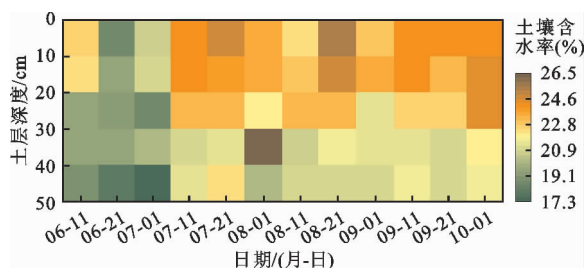


图3 2010-2018年观测期研究区平均土壤含水率时空分布

结合图2、3来看,玉米种植期土壤含水率随土壤深度的增加逐渐减小,而张晓萌等^[24]研究皖北平原南部砂姜黑土时发现:在0~50 cm土层深度,土壤水随深度的增加而增大,与本文的结论相反,这主要是因为土壤类型的不同和地下水埋深之间的差异。砂姜黑土存在裂隙,入渗率大于黄潮土,在雨季入渗量多,深层土壤水得以补给,而黄潮土受降雨的影响入渗率减小,同时皖北平原南部地下水埋深浅,对土壤水补给作用强。所以皖北平原南、北部相应深度的土壤水表现出相反的变化规律。由图3还可以看出,在种植作物前期,20~50 cm深度土壤的含水率较低,而在作物生长后期有所增大,主要是因为作物种植前期属于旱季,降雨少,地下水埋深大,而在作物生长后期,长时间的降雨对土壤水有一定的补给作用,同时地下水埋深浅,与深层的土壤水交换频繁。

3.2 降雨量对土壤水变化的影响

图4为2010-2018年观测期研究区平均土壤含水率与降雨量之间的关系。由图4看出,在7~8月累计10 d降雨量大于其他时间段降雨量,最大值出现在8月21日,为92 mm,其次是7月11日,为78 mm。最小值出现在旱季和雨季交替的月份,分别为6月初和9月底。土壤水的变化与降雨量变化具有明显的相关性,尤其是0~20 cm深度土壤水受降雨影响显著,土壤含水率随降雨的增加而增大。

40~50 cm深度的土壤水对降雨的响应较弱,有一定的延迟作用。在6月初至7月中旬,不同深度的土壤水对降雨响应最强烈,主要是经历了旱季,土壤内部储水量少,土壤水对降雨的补给非常敏感。随着降雨量增多,土壤含水率的变化相对较小。在作物种植初期,土壤含水率小,会影响作物生长,因此该时期需要制定合理的人工灌溉制度补给土壤水。

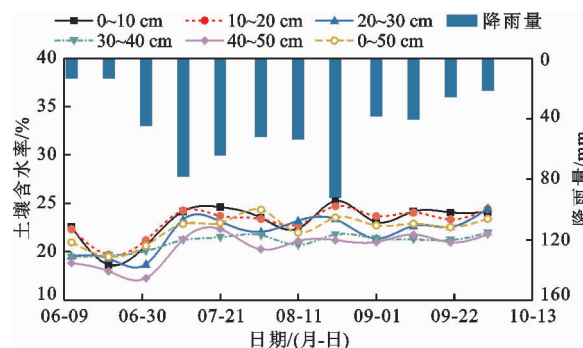


图4 2010-2018年观测期研究区不同深度平均土壤含水率与降雨量的关系

通过以上分析发现降雨量对表层土壤含水率的影响较大,因此选取2012和2014年对比分析观测期内有、无降雨条件对土壤水的影响,结果见表1。

表1中2012年6月11-7月1日均为无雨日,可以发现该时段土壤含水率随时间逐渐减小,0~30 cm深度土壤水减少幅度最大,而在2012年7月1日0~30 cm土壤含水率有所增大,主要是因为在此期间有两场小雨,总降雨量为8 mm,补充了0~30 cm土壤水,但未补给30~50 cm土壤水^[25]。2012年7月11各层土壤含水率急剧增加,主要是在该时间段内发生几场强降雨,降雨量达到350 mm,对土壤水的补给深度超过了50 cm。降雨停止后,0~30 cm土壤水迅速减少,而30~50 cm土壤水缓慢变化。2012年降雨量总体表现为场次降雨量大,降雨次数少,导致0~30 cm深度土壤含水率变化幅度大。2014年无雨日土壤水变化规律与2012年基本相似,而有雨日土壤水变化与2012年有所差异,主要是因为2014年降雨量少但降雨次数多,使0~20 cm深度土壤含水率相差不大,不会出现2012年0~30 cm深度土壤含水率“大起大落”现象。

对比表1中2012和2014年有降雨条件下土壤含水率的变化发现,降雨量多少和持续降雨时间对下层土壤水影响较大,2012年持续降雨时间长且降雨量多,导致降雨日30~50 cm深度土壤含水率与无雨日相差较大,2014年土壤水表现出相反的规律。同时还可以发现,无论是降雨日还是无雨日,0~30 cm土壤

含水率变化幅度均为最大,30 ~ 50 cm 土壤水变化幅度最小。尤其是在一场大雨过后表现最明显(2012 年 7 月 1 日-2012 年 7 月 11 日)。

3.3 地下水埋深对土壤水的影响

玉米生长期,研究区地下水埋深变化范围在 1.0 ~ 5.1 m 之间, C_v 为 30%,表明地下水埋深波动幅度较大,2010-2018 年玉米生长期研究区不同深度平均土壤含水率与地下水埋深的关系见图 5。

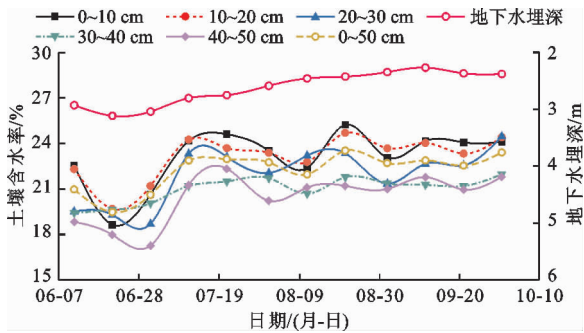


图 5 2010-2018 年观测期研究区不同深度平均土壤含水率与地下水埋深的关系

由图 5 可看出,从 6-10 月地下水埋深随时间总体呈减小趋势,且前期减小幅度较大,后期减少幅度较小,主要是前期地下水埋深大,受降雨量的补给,地下水埋深变浅。土壤含水率对地下水埋深的响应关系总体表现为随地下水埋深的增加而减小。

前期随着地下水埋深的减小,土壤含水率响应强烈,后期地下水埋深的波动变化不大。8 月 21 日土壤含水率变化幅度较大,主要与降雨有关,该时间段内降雨量最大,对土壤水的补给增多。降雨停止后,土壤水逐渐消退,随后变幅较小。

3.4 玉米不同生长期对土壤水的影响

图 6 为 2010-2018 年研究区玉米不同生长期土壤含水率变化规律。由图 6 总体来看,在玉米的不同生长期,相同深度土壤含水率的变化规律基本一致,苗期至抽雄期土壤含水率逐渐增大。分析图 6(a)可知,10、20 和 40 cm 深度土壤含水率在抽雄期最高,30 cm 深度土壤含水率在成熟期最高,50 cm 深度土壤含水率在灌浆期最高。0 ~ 50 cm 平均土壤含水率主要表现为:苗期到抽雄期逐渐增大,到抽雄期达到最大,灌浆期和成熟期土壤含水率减小且基本相同。抽雄期降雨量虽然小于灌浆期,但灌浆期作物需水量最大,需要从土壤中吸收大量的水分^[26],导致抽雄期土壤含水率最大。同时土壤含水率随深度增加而减小,与前文中分析的结果一致。由图 6(b)可见,在玉米不同的生长期,土壤含水率随着土层深度的增加而逐渐减小。

3.5 玉米不同生长期土壤水与各影响因素的相关性

表 2 为研究区玉米不同生长期与各影响因素的相关性分析结果。

表 1 2012 和 2014 年有、无降雨条件下观测期不同深度土壤含水率变化 %

年份	无雨日	土层深度/cm					有雨日	土层深度/cm				
		10	20	30	40	50		10	20	30	40	50
2012	06-11	19.1	17.3	15.3	15.2	15.5	07-11	32.0	30.7	27.7	26.9	26.8
	06-15	17.8	16.6	15.2	15.5	15.4	07-21	22.9	24.2	24.9	26.0	26.4
	06-19	13.3	14.2	15.0	15.3	15.5	08-01	16.8	17.2	21.0	23.7	23.9
	06-21	10.4	12.6	13.5	14.8	15.1	08-05	17.4	16.5	18.9	21.8	21.3
	06-26	7.3	8.8	12.3	14.6	14.4	08-21	29.2	27.9	24.4	23.8	23.6
	07-01	10.5	10.2	11.9	13.5	13.0	09-01	17.8	17.4	18.3	21.4	23.2
	07-27	19.1	21.3	22.7	24.2	24.8	09-11	19.0	21.3	21.8	21.6	23.9
	08-11	13.8	14.3	17.9	20.7	21.0	09-21	22.0	19.0	21.0	23.4	24.5
	10-01	17.8	17.7	18.0	19.1	21.0						
	10-11	16.2	16.5	17.6	18.5	20.2						
2014	07-11	17.1	19.6	23.5	19.9	19.8	07-29	22.8	22.6	20.1	16.8	16.0
	07-21	16.7	18.0	21.8	19.2	19.3	08-01	28.0	26.3	25.9	21.4	18.6
	07-23	14.4	17.8	17.8	16.2	15.2	08-11	26.3	28.0	29.1	22.9	22.5
							08-21	26.5	27.2	26.6	22.2	21.8
							09-01	27.4	30.7	29.1	22.6	22.2
							09-11	28.6	27.2	29.4	20.0	19.8
							09-21	28.1	27.5	28.2	20.2	21.4
							10-01	26.5	30.1	31.2	22.9	21.9

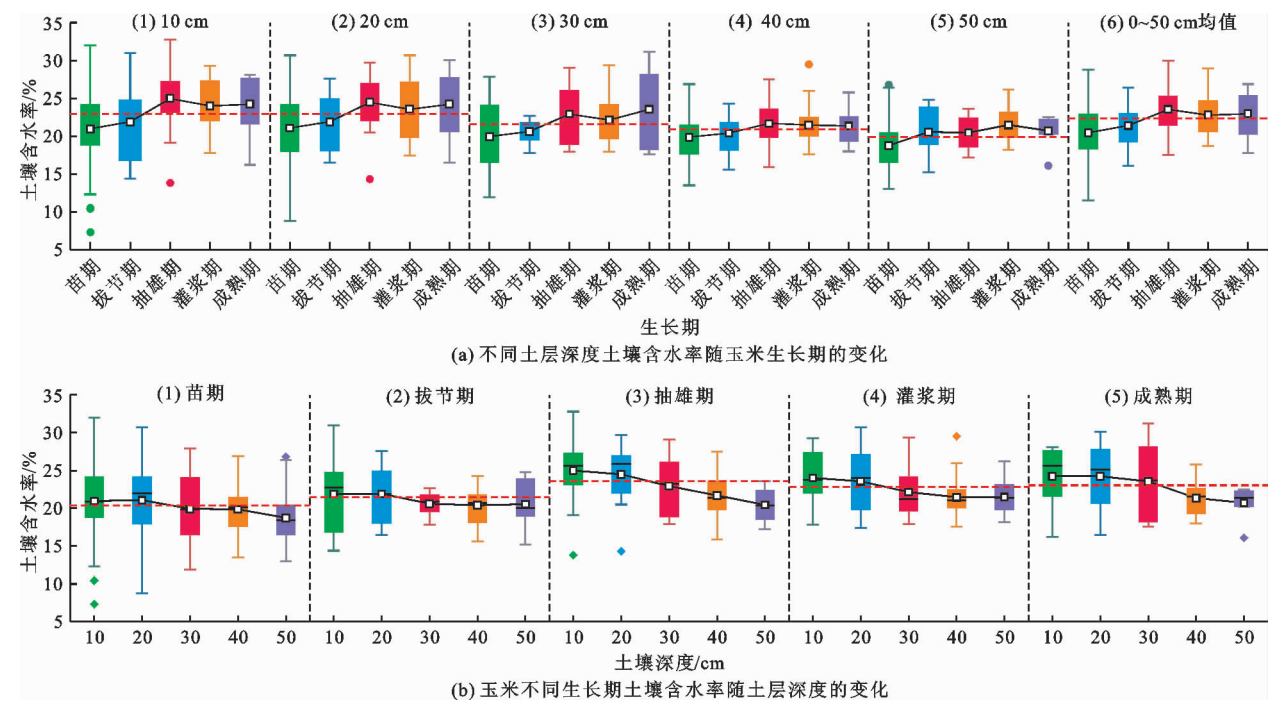


图 6 2010 – 2018 年研究区玉米不同生长期土壤含水率变化规律

表 2 研究区玉米不同生长期与各影响因素的相关性分析结果

生长期	影响因素	土层深度/cm					
		0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50	0 ~ 50
苗期	水面蒸发	0.07	0.10	0.23	0.23	0.31	0.16
	地下水埋深	-0.68 **	-0.62 **	-0.54 **	-0.62 **	-0.76 **	-0.68 **
	前期无降雨日数	-0.72 **	-0.76 **	-0.77 **	-0.68 **	-0.73 **	-0.78 **
	降雨量	0.60 **	0.56 **	0.48 **	0.54 **	0.57 **	0.60 **
拔节期	水面蒸发	-0.31	-0.24	0.38	-0.09	0.25	-0.23
	地下水埋深	-0.40	-0.32	-0.34	-0.51 *	-0.74 **	-0.50 *
	前期无降雨日数	-0.56 **	-0.45 *	-0.23	-0.34	-0.57	-0.54 **
	降雨量	0.59 **	0.37	-0.08	0.05	0.21	0.44 *
抽雄期	水面蒸发	-0.47 *	-0.34	-0.52	-0.49 *	-0.21	-0.50 *
	地下水埋深	-0.19	-0.16	0.62	-0.31	-0.25	-0.32
	前期无降雨日数	-0.74 **	-0.62 **	-0.65	-0.30	-0.50	-0.63 **
	降雨量	0.44 *	0.46 *	0.46	0.17	0.27	0.37
灌浆期	水面蒸发	-0.42 *	-0.26	-0.35	0.23	-0.04	-0.17
	地下水埋深	0.01	0.01	0.75 **	-0.45 *	-0.43	-0.19
	前期无降雨日数	-0.43 *	-0.41 *	0.13	-0.37 *	-0.36	-0.44 *
	降雨量	0.38 *	0.31	-0.25	0.65 **	0.35	0.50 **
成熟期	水面蒸发	-0.67 *	-0.63 *	-0.54	-0.43	-0.65	-0.66 *
	地下水埋深	0.18	0.13	0.54	-0.51	0.31	-0.05
	前期无降雨日数	-0.94 **	-0.79 **	-0.74	-0.66 *	-0.41	-0.86 **
	降雨量	0.75 **	0.65 *	0.69	0.58 *	0.39	0.77 **
整个生长期	水面蒸发	-0.17	-0.14	-0.40 **	-0.10	-0.36 **	-0.15
	地下水埋深	-0.36 **	-0.31 **	-0.01	-0.50 **	-0.55 **	-0.45 **
	前期无降雨日数	-0.65 **	-0.64 **	-0.63 **	-0.56 **	-0.66 **	-0.68 **
	降雨量	0.47 **	0.41 **	0.34 **	0.44 **	0.44 **	0.48 **

注：“*”为 0.05 水平下显著相关；“**”为 0.01 水平下显著相关。

由表 2 可以发现,苗期不同深度的土壤含水率与各影响因素相关性较好,而其他生长期相关性相对较差。在玉米的整个生长期,不同深度的土壤含水率与水面蒸发呈不显著($p < 0.01$)负相关关系;除 20 ~ 30 cm 外,不同深度的土壤含水率与地下水埋深呈极显著($p < 0.01$)负相关关系,总体表现为随土层深度增加与地下水埋深的相关性越大,这与张晓萌等^[24]对皖北平原南部的研究结果基本一致;与前期无降雨日数呈极显著($p < 0.01$)负相关关系;与降雨量呈极显著($p < 0.01$)正相关关系。另外,0 ~ 50 cm 深度土壤含水率对前期无降雨日数的相关性最大,为 -0.68,对水面蒸发、地下水埋深和降雨量的相关性相差不大,分别为 -0.15、-0.45 和 0.48。王丽丽等^[9]研究了皖北平原南部土壤水的影响因素,得出不同深度的土壤水与绝对湿度和地下水埋深相关性最大,在玉米不同生长期影响土壤水的主要因素有所不同。

3.6 不同影响因素的相对贡献

本文使用 BRT 算法定量分析 5 个影响因素(水面蒸发量、前期无降雨日数、降雨量、作物生长期和地下水埋深)对 0 ~ 50 cm 土壤含水率的相对贡献率。使用该方法前,检测了水面蒸发、前期无降雨日数、降雨量和地下水埋深之间的方差膨胀因子,发现均小于 10;同时该 4 个影响因素与 0 ~ 50 cm 土壤含水率之间的相关性均小于 0.7,满足多重非共线性条件。图 7 为研究区 0 ~ 50 cm 土层深度土壤含水率实测值与模拟值的关系。图 7 中实测土壤含水率与模拟土壤含水率的拟合相关系数 $R^2 = 0.72$ ($p < 0.01$),均方根误差为 1.4%。有学者对土壤含水量的研究表明,当均方根误差小于 2% 时,预测结果是可靠的^[27]。因此,可以认为 BRT 方法对地区土壤含水率的拟合结果较好。

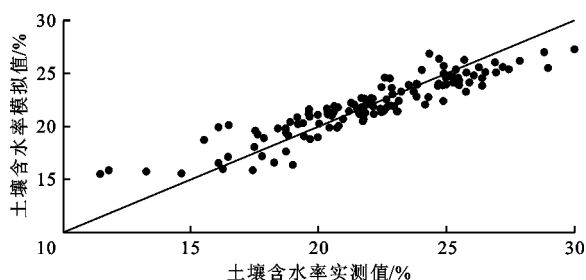


图 7 研究区 0 ~ 50 cm 土层深度土壤含水率
实测值与模拟值的关系

图 8 为不同影响因素对土壤含水率的相对贡献率。由图 8 可以发现,前期无降雨日数、地下水埋

深、降雨量、水面蒸发量和作物生长期对土壤含水率的相对贡献率分别为 42.6%、20.9%、16.8%、12.4% 和 7.3%。前期无降雨日数对土壤含水率的相对贡献率最大,其次为地下水埋深,作物生长期对土壤含水率的相对贡献率最小。因此,连续无降雨对土壤含水率的影响很大,前期无降雨日数需要被重视,在连续无降雨期间需要制定合理的灌溉计划解决作物生长需水问题。

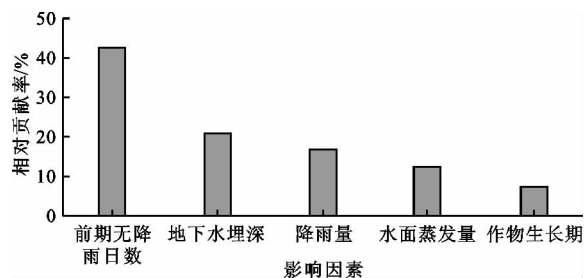


图 8 不同影响因素对土壤含水率的相对贡献率

4 讨 论

本研究主要分析了皖北平原北部黄潮土区玉米地土壤水的变化特征及地下水埋深、前期无降雨日数、降雨量、水面蒸发量和作物生长期对黄潮土区玉米地土壤水的影响。在整个剖面上的土壤水分变异和动态反映出一定的差异性和层次性^[28]。整体上该地区土壤水属于中等程度变异。根据变异系数大小可划分为 2 个典型土层,0 ~ 10 cm 为活跃层;10 ~ 50 cm 为次活跃层。总体来说土壤水 C_v 值随深度的增加而减小,主要是因为降雨对表层土壤水的影响较深层强烈,与表 1 得到的结果一致^[7]。0 ~ 10 cm 处于水分补充和消耗的交替层,受降雨和蒸发影响很大,土壤水变化剧烈;随着深度的增加,土壤水主要受作物的影响,变幅较小^[29]。

土壤水高度变异特征受到很多因素的影响,这些因素的叠加作用使土壤水形成了不同的活跃层。另外,玉米不同生长期对土壤水也有影响,不同生长期随土层深度增加接受降雨的补给作用减弱,同时根系的吸水作用使土壤水逐渐减少^[30]。在抽雄期以后,不同深度(20 ~ 50 cm)的土壤含水率呈线性减少,说明 20 ~ 50 cm 的土壤水消耗更多。主要是因为夏玉米根系生长活跃区在 0 ~ 60 cm,随着玉米生长,根系需要从土壤深层汲取水分(30 ~ 50 cm),从而减小了土壤含水率(图 6(b))^[31]。

本文使用 BRT 算法主要分析了 5 个因素对土壤水的影响,发现前期无降雨日数、地下水埋深、降

雨量、水面蒸发量和生长期对土壤含水率的相对贡献率分别为 42.6%, 20.9%, 16.8%, 12.4% 和 7.3%。前期无降雨日数对土壤含水率的相对贡献率最大,其次为地下水埋深,作物生长期对土壤含水率的相对贡献率最小。可能是因为玉米生长在雨季,有充足的雨水补给玉米生长,玉米依赖深层土壤水的需求相对较弱,而其他几个因素对土壤水变化的影响较强,导致分析 5 个驱动因子对土壤水变化的影响时,作物生长期对土壤水变化的影响最小。Cheng 等^[32]认为我国东南部土壤水主要受降水的影响。有学者认为除降水外,其他气象环境因素均对土壤水有重要影响,甚至超过降雨对土壤水的影响^[33-34]。本文也得到类似的结果。也有学者认为,植被高度以及生长环境的海拔和坡度也是影响土壤水的关键潜在因素^[5]。Gao 等^[35]认为土壤质地对土壤水的影响作用大于地形影响。综上所述,不同地区不同因素对土壤水的影响不一,该研究对了解土壤水的变异特征具有重要意义。

5 结 论

(1)玉米生长期内,土壤水随土层深度增加而减少。0~50 cm 土壤水属于中等程度变异。表层(0~10 cm)为土壤水活跃层;10~50 cm 为土壤水次活跃层。

(2)无论有无降雨,0~30 cm 土层深度的土壤含水率变化幅度最大,30~50 cm 土层深度的土壤含水率变化幅度最小,30 cm 为土壤含水率缓慢变化的临界深度。

(3)在玉米整个生长期,0~50 cm 深度的土壤含水率与水面蒸发呈不显著负相关关系;与地下水埋深呈极显著负相关关系(20~30 cm 除外);与前期无降雨日数呈极显著负相关关系;与降雨量呈极显著正相关关系。

(4)前期无降雨日数对土壤含水率的相对贡献率最大,为 42.6%,其次为地下水埋深,为 20.9%,作物生长期对土壤含水率的相对贡献率最小,仅为 7.3%。

本研究中常规观测土壤水的土层深度为 0~50 cm,今后需要补充 50~100 cm 或更深土层的土壤水观测,研究 50 cm 以下的土壤水变化特征及影响因素。

参考文献:

[1] ISTANBULLUOGLU E, BRAS R L. On the dynamics of

soil moisture, vegetation, and erosion: Implications of climate variability and change[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42: W06418.

- [2] CAI Yu, ZHEND Wengang, ZHANG Xin, et al. Research on soil moisture prediction model based on deep learning[J]. *PLoS One*, 2019, 14(4): e0214508.
- [3] LI Xuezhong, SHAO Mingan, JIA Xiaoxu, et al. Profile distribution of soil-water content and its temporal stability along a 1340-m long transect on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2016, 137: 77-86.
- [4] WU Gaolin, LIU Yu, FANG Nufeng, et al. Soil physical properties response to grassland conversion from cropland on the semi-arid area[J]. *Ecohydrology*, 2016, 9(8): 1471-1479.
- [5] 张璐,朱仲元,张圣微,等. 半干旱草原型流域土壤水分变异及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(13): 124-132.
- [6] 邱扬,傅伯杰. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(5): 715-720.
- [7] 韩湘云,景元书,李根. 低丘红壤坡面土壤水分变化的气象因素冗余分析[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(9): 2368-2374.
- [8] ENGLISH N B, WELTZIN J F, FRAVOLINI A, et al. The influence of soil texture and vegetation on soil moisture under rainout shelters in a semi-desert grassland[J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(1): 324-343.
- [9] 王丽丽,王振龙,杜富慧,等. 基于水文气象多因子的夏玉米生育期土壤水分预测研究[J]. *节水灌溉*, 2020, (7): 54-58+62.
- [10] 路璐,王振龙,杜富慧,等. 淮北平原基于水文气象多因子的土壤水分动态预测[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(4): 237-243.
- [11] 陈思淳,黄本胜,王晓刚,等. 杨楼流域降水变化特征及CMIP5气候模式评估[J]. *人民珠江*, 2018, 39(6): 58-62+97.
- [12] 王振龙,杜明成,姜翠玲,等. 基于人工降雨试验的淮北地区产流产沙差异性研究[J]. *水科学进展*, 2019, 30(4): 507-514.
- [13] 陶晔,齐永志,屈赞,等. 基于增强回归树的海河平原小麦赤霉病预测模型构建与验证[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(18): 3860-3870.
- [14] SUN Shaobo, CHE Tao, LI Hongyi, et al. Water and carbon dioxide exchange of an alpine meadow ecosystem in the northeastern Tibetan Plateau is energy-limited[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 275: 283-295.
- [15] 李春林,刘淼,胡远满,等. 基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析[J]. *生态学报*, 2014, 34(3): 727-737.
- [16] LIU Qin, WANG Tiejun, HAN Qiong, et al. Diagnosing

- environmental controls on actual evapotranspiration and evaporative fraction in a water-limited region from northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124045.
- [17] PITTMAN S J, COSTA B M, BATTISTA T A. Using Li-dar bathymetry and boosted regression trees to predict the diversity and abundance of fish and corals[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(6): 27–38.
- [18] AERTSEN W, KINT V, VAN ORSHOVEN J, et al. Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(8): 1119–1130.
- [19] CERDÀ A. Soil erosion after land abandonment in a semi-arid environment of southeastern Spain[J]. *Arid Soil Research & Rehabilitation*, 1997, 11(2): 163–176.
- [20] 袁水龙,李占斌,张 扬,等. 黄土高原小流域坝地水分时空分布特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 29–34.
- [21] CHEN Hongsong, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al. Soil moisture dynamics under different land uses on karst hillslope in northwest Guangxi, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 61(6): 1105–1111.
- [22] 郭 勇,尹鑫卫,李 彦,等. 农田-防护林-荒漠复合系统土壤水盐运移规律及耦合模型建立[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 87–101.
- [23] 杜明成,王振龙,姜翠玲,等. 淮北平原黄潮土多雨强变坡度产流产沙规律试验模拟[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 34–39.
- [24] 张晓萌,王振龙,杜富慧,等. 淮北平原浅埋区地下水埋深对土壤水变化的影响研究[J]. *节水灌溉*, 2019(9): 6–9.
- [25] 杨建锋,刘士平,张道宽,等. 地下水浅埋条件下土壤水动态变化规律研究[J]. *灌溉排水*, 2001, 20(3): 25–28.
- [26] 孙宁霞,马 英,胡晓农,等. 基于同位素示踪的夏玉米土壤水分动态变化规律[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(4): 256–260.
- [27] COSH M H, JACKSON T J, MORAN S, et al. Temporal persistence and stability of surface soil moisture in a semi-arid watershed [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(2): 304–313.
- [28] 马婧怡,贾宁凤,程 曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(10): 3471–3481.
- [29] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 4961–4968.
- [30] 李春华,公芙蓉,崔一杰,等. 山西中北部春玉米生长季土壤水分动态及对产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(24): 246–250.
- [31] 廖荣伟,刘晶淼,白月明,等. 玉米生长后期的根系分布研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(3): 284–291.
- [32] CHENG Shanjun, GUAN Xiaodan, HUANG Jianping, et al. Long-term trend and variability of soil moisture over East Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(17): 8658–8670.
- [33] 王春林,郭 晶,陈慧华,等. 基于土壤水分模拟的干旱动态监测指标及其适用性[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(2): 401–407.
- [34] MA Keming, FU Bojie, LIU Shiliang, et al. Multiple-scale soil moisture distribution and its implications for ecosystem restoration in an arid river valley, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(1): 75–85.
- [35] GAO Xiaodong, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2011, 87(3): 357–367.