第30卷第4期
2019年 8月
水资源与水工程学报
Journal of Water Resources & Water Engineering
Vol.30 No.4
Aug.,2019

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.04.37

淮北平原基于水文气象多因子的土壤水分动态预测

路 璐[1], 王振龙[2], 杜富慧[1], 胡永胜[2], 张晓萌[1]

(1.河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056021; 2.安徽省(水利部淮委)水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000)

摘 要:为研究土壤水分动态变化,利用五道沟水文实验站1989-2015年水文气象和大田土壤水实测资料,采用灰色关联度和线性回归分析,建立了冬小麦各生长阶段不同土层土壤水分预测模型。结果表明:不同土层土壤水分与气象因子的关联度一致;不同生长阶段土壤水分与气温和地下水埋深关联度最强,分别达0.92和0.95;分蘖-越冬期,土壤水分与地下水埋深和日照时数关联度最强,其他生长阶段,土壤水分与气温和地下水埋深关联度最强。通过水文气象因子模拟土壤水分拟合度较高,R^2达0.94。不同生长阶段不同土层,土壤水分计算模型均具有良好的预测能力,R^2达0.80。成果为实施作物不同生长阶段的灌溉计划提供科学依据。

关键词:冬小麦;土壤水分;水文气象因子;灰色关联度;多元线性回归;土壤水分动态

中图分类号:S152.7 **文献标识码**:A **文章编号**:1672-643X(2019)04-0237-07

Dynamic prediction of soil moisture based on hydrometeorological multi-factors in Huaibei Plain

LU Lu[1], WANG Zhenlong[2], DU Fuhui[1], HU Yongsheng[2], ZHANG Xiaomeng[1]

(1. *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056021, *China*; 2. *Water Resources Research Institute of Anhui Province*, *Bengbu* 233000, *China*)

Abstract: To study the dynamic changes of soil moisture, the gray correlation and multiple linear regression analysis were used based on hydrological meteorological and soil water measurements data from 1989 to 2015 at Wudaogou Hydrological Experiment Station, and Hydrological and meteorological factors and soil moisture prediction models in different soil layers at each growth stage of winter wheat were established. The results indicated that the correlation degree between soil moisture and meteorological factors in different soil layers at the same growth stage was the same. The correlation degree between soil moisture and temperature and groundwater depth was the strongest, with correlation coefficient 0.92 and 0.95, respectively. During the tillering-overwintering period, the correlations between soil moisture and groundwater depth, sunshine hours was the strongest, while the correlation degree between soil moisture and temperature, groundwater depth was the strongest in other growth stages. The fitting of soil moisture by hydrometeorological factors was relatively high ($R^2=0.94$). The soil moisture calculation models have different prediction ability in different soil layers at different growth stages ($R^2=0.80$). This study provides a basis for the implementation of irrigation plans at different stages of crop growth.

Key words: winter wheat; soil moisture; hydrometeorological factors; grey correlation degree; multiple linear regression; soil moisture dynamic

1 研究背景

土壤水分作为调控土壤—植物—大气(SPAC)反馈系统中的重要参数之一,是植物吸收水分的主要来源[1]。淮北地区作为国家重要的农业种植基地,农作物以小麦、大豆等旱作为主,土壤水分主要来源于降水和灌溉,且与作物类型、土壤质地和气候条件存在强烈的耦合关系[2]。因此,为科学制定灌

收稿日期:2019-02-22; **修回日期**:2019-04-08
基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0404504)
作者简介:路 璐(1995-),女,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。
通讯作者:王振龙(1965-),男,安徽寿县人,博士,教授级高级工程师,主要从事水文水资源实验研究。

溉制度,精确掌握土壤水分变化尤为重要。

目前国内外学者研究土壤水分的方法有很多,主要有水量平衡法[3]、经验公式法[1-2,4-7]、神经网络法[8-10]、时间序列法[11-12]及遥感法[13-16]。水量平衡法作为最经典的方法,其优点是原理简单,应用土壤水分平衡原理研究土壤水分,但边界条件难以控制,所需参数难以测定。经验公式法是近些年应用较多的研究土壤水分的方法,比如,崔琳等[1]对黑龙江省西部林地基于气象因子采用逐步回归的方法,建立了土壤水分计算模型;张聪聪等[5]对太湖地区采用通径分析法发现影响土壤水分的主要气象因子为降水量,并建立了多元回归模型。神经网络法和时间序列法大多是采用相关软件进行数据训练以寻找合适的预测模型。BAI 等[10]基于小波分析和 NARX 神经网络预测了黄土丘陵区土壤水分预测模型,预测精度较高($P>0.95$)。Prasad 等[8]研究了澳大利亚默累—达令盆地 10 ~20 cm、20 ~150 cm 土层土壤水分变化规律,基于神经网络模型,将气候动力学作为输入,建立了水分预测模型。Huang 等[9]研究了黑龙江省红星农场不同月份不同土层土壤水分,并结合遗传算法和 BP 神经网络,建立了土壤水分预测模型。Liu 等[11]基于 ARIMA 模型研究了贵州省黄壤土土壤水分变化规律。白燕英等[14]基于 ETM + 遥感影像数据,建立了土壤水分遥感反演模型。

综合以上研究,本文在识别和掌握冬小麦生长情景下土壤水分变化规律的基础上,将冬小麦全生育阶段依据其生长特性划分为 4 个生长阶段,采用灰色关联度和线性回归的方法,对淮北平原区砂姜黑土冬小麦不同生长阶段土壤水分变化规律及其随关键气象要素变化的函数关系进行拟合,建立反映冬小麦不同生长阶段及水文气象要素变化的土壤水分计算模型,以计算冬小麦不同生长阶段的土壤水分变化量。

2 材料与方法

2.1 实验区概况

五道沟水文实验站位于淮北平原南部,地处蚌埠市新马桥原种场境内,东经 117°21′,北纬 33°09′。该区四季分明,属暖温带半湿润季风气候,多年平均降水量 893 mm,多年平均汛期降雨量占年降水总量的 62.0%,多年平均气温 13.5 ~14.9℃,多年平均蒸发量 851.5 mm,多年平均风速 3 m/s,多年平均干旱指数 0.96。该区地下水位变幅 1 ~2.5 m,属浅埋区。农业种植为一年两熟制,冬季种植小麦,夏季为玉米和大豆。区域内土壤类型较复杂,主要为砂姜黑土,占淮北平原总面积 54%,其中,砂姜黑土的凋萎系数在 8% ~14% 之间,田间持水率在 24% ~26% 之间。砂姜黑土土壤颗粒分布:0.05 ~0.01 mm 的土壤粒径占 40%,0.005 ~0.001 mm 的土壤粒径占 25%,土壤容重为 1.36 g/cm^3,渗透系数为 24.2 mm/h。

2.2 资料选取

本文以淮北平原砂姜黑土为研究对象,水文气象资料采用五道沟水文实验站 1989 -2015 年长系列冬小麦生长期逐日地下水埋深、气温、风速、降水、日照、蒸发等水文气象因子实测数据。土壤水资料采用 1989 -2015 年冬小麦生长期每 5 日(日期逢 1、逢 6)人工观测大田土壤水数据(重量含水率)。建立 0 ~10、20 ~30、40 ~50、60 ~80 cm 土层土壤水分计算模型并验证,其中 20 ~30 cm 土层土壤水分受蒸发、灌溉和降水影响相对较大,作为土壤表墒层[17];40 ~50 cm 土层是冬小麦根系密度最大层,作为失墒敏感层[18];60 ~80 cm 土层与地下水位关系密切,作为土壤底墒层。

冬小麦生长周期约为 230 ~270 d,一般于每年 10 月中旬播种,5 月下旬收获,将生长期划分为 4 个生长阶段:出苗 - 分蘖、分蘖 - 越冬、返青 - 拔节、抽穗 - 成熟。根据冬小麦实际生长状况及淮北平原气候影响因素,各生长阶段划分如下:

表 1 冬小麦生长阶段划分

生育期	日期(月 - 日)	天数
出苗 - 分蘖	10-26 - 11-21	27
分蘖 - 越冬	12-01 - 02-26	88
返青 - 拔节	03-06 - 04-21	47
抽穗 - 成熟	05-01 - 06-01	32

2.3 分析方法

运用灰色关联分析法分析水文气象因子对土壤水分的影响。本文灰色关联分析主要用来分析土壤水分与哪些水文气象要素有关,在多大程度上影响土壤水分的变化,进一步说明在冬小麦各生长阶段哪些水文气象因子对土壤水分变化起到主要影响和次要影响。

采用 Matlab R2016b 软件,具体计算步骤如下:建立各因素原始数据矩阵;求初值像矩阵及差序列;计算关联系数及灰色关联度,对关联度进行排序,关

联度越大,序列联系越紧密。

基于冬小麦不同生长阶段(出苗－分蘖、分蘖－越冬、返青－拔节、抽穗－成熟)不同土层(0～10、20～30、40～50、60～80 cm)主要水文气象因子对土壤水分进行回归分析,建立回归模型。采用 2013－2015 年各生长阶段不同深度土壤水分实测数据进行模型验证。

3　模型构建及评价指标

3.1　灰色关联分析的计算方法

根据模型的分析,在此用灰色关联度分析方法分析水文气象要素对土壤水分的影响。

灰色关联度为:

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}\xi_{0i}(k) \tag{1}$$

将公式(1) 计算的各要素关联度进行大小排序,关联度越大,自变量与因变量的相关性越密切。

3.2　线性回归模型

选取关联度较大的主要水文气象要素,建立土壤水分多元线性回归模型。计算公式为:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_kx_k \tag{2}$$

式中:y 为因变量; $x_1,x_2,\cdots,x_k$ 为自变量; b_0 为常数项; $b_1,b_2,\cdots,b_k$ 为经验系数。

3.3　评价指标

评价指标包括平均绝对误差 MAE、均方根误差 $RMSE$、相关系数 r 和一致性指数 d_{IA},用以评价预测结果与实测结果之间的误差及一致性情况。各指标计算公式如下:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|x_i - y_i|}{n} \tag{3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}{n}} \tag{4}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{5}$$

$$d_{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|x_i-\bar{y}|+|y_i-\bar{y}|)^2} \tag{6}$$

式中:x_i 为 ET_0 模型计算值; y_i 为 ET 实际值; i 为样本序数,$i=1,2,\cdots,n$; $\bar{x}$ 为计算值的均值; $\bar{y}$ 为实际值的均值; n 为计算值的样本数。

通常计算的误差(MAE 和 $RMSE$) 越小,预报准确率越大,计算方法表现越好。相关系数 r 和一致性指数 d_{IA} 越接近于 1,表明实际值与预测值越接近,模型的预测能力越强。

4　结果与分析

4.1　气象因子与土壤水分灰色关联度

本文采用地下水埋深、风速、气温、蒸发、降水、日照等要素,综合分析其对土壤水分变化的影响,分别计算冬小麦不同生长阶段不同深度土层土壤水分与水文气象因子的灰色关联度,如表 2 所示。从表 2 可知,同一生长阶段不同深度土层(0～10、20～30、40～50、60～80 cm)土壤水分与水文气象因子的关联度大小变化一致,其中出苗－分蘖期土壤水分与水文气象因子(温度 T、地下水埋深 D、日照时数 S、风速 W、蒸发 E、降水 P) 的灰色关联度由大到小依次为 $T > D > S > W > E > P$,分蘖－越冬期为 $D > S > W > T > E > P$,返青－拔节期为 $T > D > S > W > E > P$,抽穗－成熟期为 $T > D > W > E > S > P$。其中地下水埋深对土壤水分的影响较大,主要是因为该区为地下水浅埋区,最大埋深为 2.5 m,且地下水埋深对 60～80 cm 土层土壤水影响较大。

各生长阶段不同土层土壤水分与降水关联度相对最弱,关联系数均为 0.88,是因为在冬小麦生长期,有效降水量相对较少,主要靠地下水补给满足作物生长。土壤水分与气温和地下水埋深关联度最强,关联系数分别为 0.92 和 0.95。分蘖－越冬期,土壤水分与地下水埋深和日照时数关联度最强,其他生长阶段,土壤水分与气温和地下水埋深关联度最强,主要是因为分蘖－越冬期比其它 3 个阶段平均温度低 7℃。

4.2　土壤水分预测模型

从表 2 可知,分蘖－越冬期各土层与土壤水分关联度最强的两个因子为地下水埋深和日照时数,其他 3 个生长阶段均为气温和地下水埋深,分别将关联度最强的两个因子与冬小麦生长期不同土层土壤水分建立多元线性回归预测模型,模型结果见表 3、4。从表 3、4 可知,4 个生长阶段均表现为较高的预测精度,$R^2=0.688～0.935$,拟合结果均为极显著($P<0.01$),可用作土壤水分预测。

4.3　土壤水分预测模型的检验

采用 2013－2015 年冬小麦生长期土壤水分资料和相关气象资料,分别计算各生长阶段不同土层

土壤水分值,并绘制冬小麦全生育期不同土层土壤水分预测值与实测值对比图,见图1。由图1看出,土壤水分预测值与实测值变化趋势基本一致:0~10和20~30 cm土层土壤水分变化趋势较大,40~50和60~80 cm土层土壤水分变化趋势较稳定。各土层土壤水分实测值与预测值的 MAE 依次为:0.68、0.60、0.50、0.40,$RMSE$ 依次为:0.90、1.94.、0.89、0.62,r 依次为0.95、0.94、0.95、0.98,d_{IA} 依次为0.97、0.97、0.98、0.99。0~10和20~30 cm预测精度相对较差,其余土层均精度较高,主要是因为0~10和20~30 cm土层受人为因素、土壤翻作、降水等影响较大,故表层土壤水分波动较大,拟合精度相对较差。

对冬小麦各生长阶段土壤水分预测精度进行综合评价,结果见表5。从表5可知,冬小麦出苗-分蘖期不同土层(0~10、20~30、40~50、60~80 cm)平均绝对误差 MAE 依次为1.01、1.37、1.06、1.32,均方根误差 $RMSE$ 依次为1.77、1.73、1.42、3.25,误差值较小,相关系数 r 依次为0.83、0.71、0.65、0.75,一致性指数 d_{IA} 依次为0.91、0.83、0.80、0.85,均接近1。冬小麦分蘖-越冬期不同土层平均绝对误差 MAE 依次为0.63、1.15、0.93、1.30,均方根误差 $RMSE$ 依次为1.24、2.86、1.60、2.99,误差值较小,相关系数 r 依次为0.93、0.92、0.88、0.63,一致性指数 d_{IA} 依次为0.96、0.95、0.82、0.76,均大于0.75。

表2 不同深度土层气象因子与土壤水分灰色关联度及位次

生育期	气象因子	0~10 cm		20~30 cm		40~50 cm		60~80 cm	
		关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次
出苗-分蘖	T	0.9599	1	0.9599	1	0.9599	1	0.9599	1
	D	0.9513	2	0.9555	2	0.9569	2	0.9573	2
	S	0.9331	3	0.9331	3	0.9331	3	0.9331	3
	W	0.9308	4	0.9308	4	0.9308	4	0.9308	4
	E	0.9224	5	0.9224	5	0.9224	5	0.9224	5
	P	0.9090	6	0.9090	6	0.9090	6	0.9090	6
分蘖-越冬	T	0.9356	4	0.9355	4	0.9355	4	0.9355	4
	D	0.9647	1	0.9668	1	0.9679	1	0.9674	1
	S	0.9585	2	0.9585	2	0.9585	2	0.9585	2
	W	0.9396	3	0.9396	3	0.9396	3	0.9396	3
	E	0.9329	5	0.9329	5	0.9329	5	0.9329	5
	P	0.9273	6	0.9273	6	0.9273	6	0.9273	6
返青-拔节	T	0.9394	1	0.9394	1	0.9394	1	0.9394	1
	D	0.9316	2	0.9353	2	0.9374	2	0.9375	2
	S	0.9136	3	0.9136	3	0.9136	3	0.9136	3
	W	0.8946	4	0.8946	4	0.8946	4	0.8946	4
	E	0.8898	5	0.8898	5	0.8898	5	0.8898	5
	P	0.8801	6	0.8801	6	0.8801	6	0.8801	6
抽穗-成熟	T	0.9616	1	0.9616	1	0.9616	1	0.9616	1
	D	0.9525	2	0.958	2	0.9597	2	0.9597	2
	S	0.8966	5	0.8966	5	0.8966	5	0.8966	5
	W	0.9075	3	0.9075	3	0.9075	3	0.9075	3
	E	0.9039	4	0.9039	4	0.9039	4	0.9039	4
	P	0.8773	6	0.8773	6	0.8773	6	0.8773	6

注:T 为平均气温、D 为地下水埋深、S 为日照时数、W 平均风速、E 为水面蒸发、P 为降水。

表 3　冬小麦 3 个生长期不同深度土层土壤水分预测模型

土层深度/cm	生长阶段	拟合参数值				参数检验	
		C	W_0	T	D	R^2	P
0～10	出苗－分蘖	1.270	0.848	0.175	－0.116	0.925	<0.01
	返青－拔节	2.338	0.852	－0.024	0.108	0.896	<0.01
	抽穗－成熟	3.228	0.839	－0.005	－0.305	0.868	<0.01
20～30	出苗－分蘖	3.096	0.799	0.163	－0.225	0.818	<0.01
	返青－拔节	－3.537	1.082	0.078	0.284	0.934	<0.01
	抽穗－成熟	1.609	0.904	0.028	－0.363	0.905	<0.01
40～50	出苗－分蘖	－2.502	1.085	0.020	0.007	0.896	<0.01
	返青－拔节	3.146	0.894	－0.047	－0.209	0.880	<0.01
	抽穗－成熟	0.871	0.886	0.008	0.425	0.890	<0.01
60～80	出苗－分蘖	0.573	1.007	－0.048	－0.020	0.868	<0.01
	返青－拔节	2.526	0.923	－0.102	－0.023	0.688	<0.01
	抽穗－成熟	1.354	0.888	0.001	0.116	0.935	<0.01

注:曲线形式为 $W_s = C + aW_0 + bT + cD$。

表 4　冬小麦分蘖－越冬期不同深度土层土壤水分预测模型

土层深度/cm	生长阶段	拟合参数值				参数检验	
		C	W_0	T	D	R^2	P
0～10	分蘖－越冬	1.270	0.848	0.175	－0.116	0.925	<0.01
20～30		2.338	0.852	－0.024	0.108	0.896	<0.01
40～50		3.228	0.839	－0.005	－0.305	0.868	<0.01
60～80		3.096	0.799	0.163	－0.225	0.818	<0.01

注:曲线形式为 $W_s = C + aW_0 + bD + cS$。

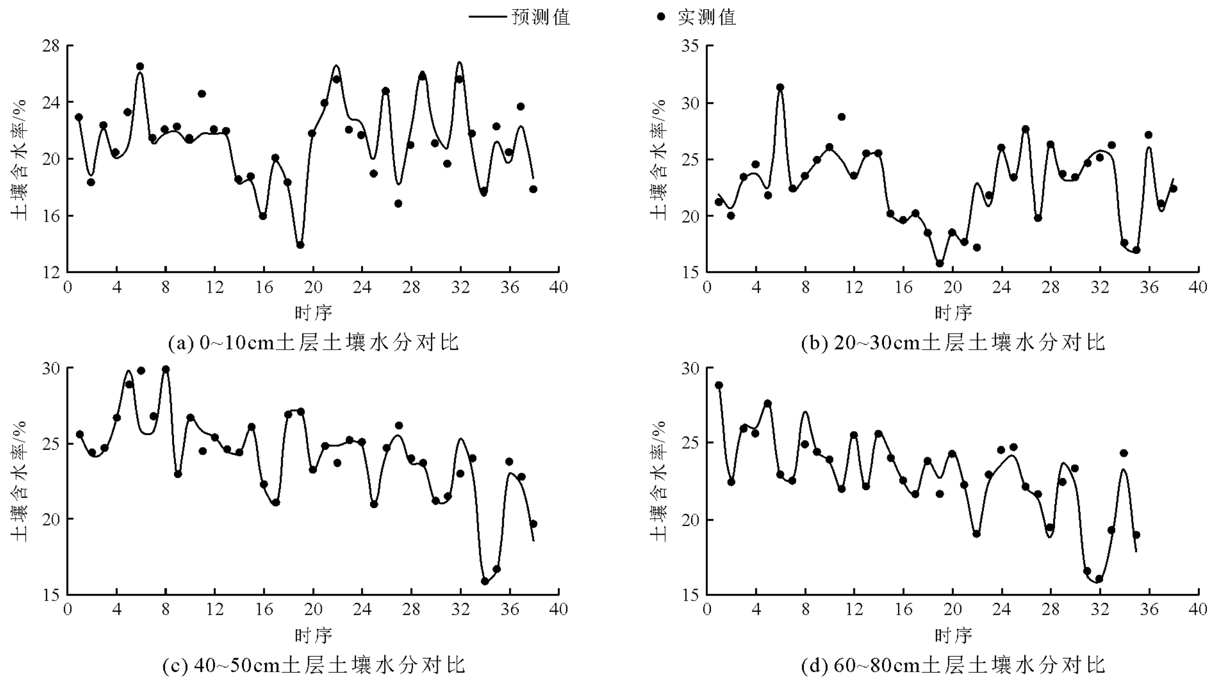

图 1　冬小麦全生育期不同土层水分预测值与实测值对比图

冬小麦返青－拔节期不同土层平均绝对误差 MAE 依次为 1.00、1.03、1.18 、1.07，均方根误差 $RMSE$ 依次为 1.19、1.79、2.56、2.11，误差值较小，相关系数 r 依次为0.99、0.94、0.64、0.62，一致性指数 d_{IA} 依次为 0.97、0.97、0.80、0.78，均接近 1。冬小麦抽穗－成熟期不同土层平均绝对误差 MAE 依次为1.01、1.50、1.64、1.09，均方根误差 $RMSE$ 依次为 1.12、3.80、3.92、1.75，误差值较小，相关系数 r 依次为 1.00、0.94、0.65、0.92，一致性指数 d_{IA} 依次为 0.99、0.97、0.81、0.95，均接近 1。表明该模型具有较好的预测能力，预测精度较高。

表 5 冬小麦各生长阶段不同深度土壤水分预测精度评价指标值

土层深度/cm	生育期	MAE	$RMSE$	r	d_{IA}
0～10	出苗－分蘖	1.01	1.77	0.83	0.91
	分蘖－越冬	0.63	1.24	0.93	0.96
	返青－拔节	1.00	1.19	0.99	0.97
	抽穗－成熟	1.01	1.12	1.00	0.99
20～30	出苗－分蘖	1.37	1.73	0.71	0.83
	分蘖－越冬	1.15	2.86	0.92	0.95
	返青－拔节	1.03	1.79	0.94	0.97
	抽穗－成熟	1.50	3.80	0.94	0.97
40～50	出苗－分蘖	1.06	1.42	0.65	0.80
	分蘖－越冬	0.93	1.60	0.88	0.82
	返青－拔节	1.18	2.56	0.64	0.80
	抽穗－成熟	1.64	3.92	0.65	0.81
60～80	出苗－分蘖	1.32	3.25	0.75	0.85
	分蘖－越冬	1.30	2.99	0.63	0.76
	返青－拔节	1.07	2.11	0.62	0.78
	抽穗－成熟	1.09	1.75	0.92	0.95

5 结 论

本文采用五道沟水文实验站 1989－2015 年长系列土壤水分资料及气象资料，分析了砂姜黑土冬小麦生育期土壤水分与水文气象因子灰色关联度，揭示了冬小麦在各生育期不同土层的土壤水分随水文气象因子的变化规律，构建了冬小麦各生育期不同土层土壤水分计算模型。

(1)本文分别计算冬小麦不同生长阶段不同土层土壤水分与水文气象因子的灰色关联度，其中温度 T、地下水埋深 D、日照时数 S、风速 W、蒸发 E、降水 P 等水文气象因子对土壤水分影响最大，且冬小麦出苗－分蘖期、返青－拔节期、抽穗－成熟期各相关因子的影响程度一致，均为 $T > D > S > W > E > P$，分蘖－越冬期为 $D > S > W > T > E > P$。

(2)利用灰色关联度方法分析水文气象因子与土壤水分的相关性，结果表明：同一生长阶段不同土层(0～10、20～30、40～50、60～80 cm)土壤水分与水文气象因子的灰色关联度大小变化趋势一致；各生长阶段不同土层的土壤水分与降水关联度最弱(关联系数为 0.88)，与气温和地下水埋深关联度最强(关联系数分别为 0.92 和 0.95)；分蘖－越冬期，土壤水分与地下水埋深和日照时数关联度最强，其他生长阶段，土壤水分与气温和地下水埋深关联度最强，相关系数达 0.95。

(3)研究提出分蘖－越冬期各土层与土壤水分关联度最强的两个因子为地下水埋深和日照时数，其他 3 个生长阶段均为气温和地下水埋深，并分别构建了不同土层土壤水分预测模型。该模型结构物理意义明确，具有较好的拟合度，R^2 为 0.69 ～ 0.94，拟合结果均为极显著($P < 0.01$)。

(4)根据水文气象要素建立的冬小麦土壤水分预测模型具有较高预测精度。预测值与实测值相关系数为 0.62～0.94，一致性指数为 0.96～0.97，绝对误差和均方误差均小于 4.0。

本文的土壤水分预测模型具有较高的预报能力，能满足农业节水灌溉目标管理。

从灰色关联度、模型结构、拟合优度及误差方面综合分析，该计算模型较好地反映了土壤水分变化规律，可直接用于类似地区冬小麦种植时期土壤水分计算。在气候条件及下垫面条件存在差异的地区，土壤水分计算模型还有待进一步研究。

参考文献：

[1] 崔 琳，王力刚，张玉柱，等. 黑龙江省西部防护林地土壤水分动态及其预报[J]. 水土保持通报，2017，37(4)：40－46.

[2] 孙秀邦，严 平，黄 勇，等. 淮北地区土壤墒情动态预测[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)，2007，30(9)：1144－1147.

[3] CEPPI A ，RAVAZZANI G ，CORBARI C ，et al. Real－time drought forecasting system for irrigation management [C]// Egu General Assembly Conference. Copernicus Publications，2014.

[4] ZhANG Xiumei，PAN Yuchun，GAO Bingbo，et al. Preliminary study on soil moisture forecast of winter wheat[C]// International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. Springer，Berlin，Heidelberg：2011.

[5] 张聪聪，陈效民，张 勇，等. 气象因子对太湖地区旱作农田土壤水分动态的影响[J]. 中国农业科学，2013，46

(21):4454 - 4463.
[6] 顾天真,徐 云,张 琪,等.基于气象因子的启东市土壤墒情预报研究[J].安徽农业科学, 2016,44(34):174 - 176.
[7] 舒素芳,钱华峰,邱小伟.基于气象因子的金华市土壤墒情预测模型[J].中国农业气象,2009,30(2):180 - 184.
[8] PRASAD R , DEO R C , LI Y , et al. Ensemble committee - based data intelligent approach for generating soil moisture forecasts with multivariate hydro - meteorological predictors [J]. Soil and Tillage Research, 2018,181:63 - 81.
[9] HUANG Caojun ,LI Lin ,REN Souhua ,et al. Research of soil moisture content forecast model based on genetic algorithm BP Neural Network[M]// Computer and Computing Technologies in Agriculture IV. Springer, Berlin, Heidelberg: 2011.
[10] BAI Dongmei,GUO Zhongsheng,GUO Mancai. Application of wavelet analysis and narx neural network in the forecast of soil moisture[C]// Science and Engineering Research Center. International Conference on Advances in Management Science and Engineering. Destech Publications. 2015:145 - 149.
[11] LIU Min, HE Zhimin. Research and prediction of yellow soil moisture content in Guizhou province based on arima model[J]. Advanced Materials Research, 2013,690 - 693:3076 - 3081.
[12] 张和喜,杨 静,方小宇,等.时间序列分析在土壤墒情预测中的应用研究[J].水土保持研究,2008,15(4):82 - 84.
[13] BHUIYAN H, MCNAIRN H, POWERS J, et al. Application of HEC - HMS in a cold region watershed and use of RADARSAT - 2 soil moisture in initializing the model [J]. Hydrology, 2017,4(1):1 - 19.
[14] 白燕英,魏占民,刘全明,等.基于 ETM + 遥感影像的农田土壤含水率反演研究[J].灌溉排水学报,2013,32(4):76 - 78 + 102.
[15] 张成才,吴泽宁,余弘婧.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.
[16] 彭致功,刘 钰,许 迪,等.基于遥感 ET 数据的区域水资源状况及典型农作物耗水分析[J].灌溉排水学报,2008,27(6):6 - 9.
[17] 胡 玮,严昌荣,李迎春,等.气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J].生态学报,2014,34(9):2367 - 2377.
[18] 刘荣花,朱自玺,方文松,等.冬小麦根系分布规律[J].生态学杂志,2008,27(11):2024 - 2027.

(上接第 236 页)

[6] 裴 亮, 廖晓勇, 孙莉英. 再生水滴灌土壤重金属 Cd 分布运移实验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2018(5):74 - 77.
[7] 裴 亮, 廖晓勇, 孙莉英. 再生水滴灌土壤和植物中重金属积累分布研究[J]. 节水灌溉, 2018(3):42 - 45.
[8] TERNES T A, BONERZ M, HERRMANN N, et al. Irrigation of treated wastewater in Braunschweig, Germany: An option to remove pharmaceuticals and musk fragrances [J]. Chemosphere, 2007,66(5):894 - 904.
[9] ELGALLAL M, FLETCHER L, EVANS B. Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review [J]. Agricultural Water Management, 2016,177:419 - 431.
[10] 刘 源, 崔二苹, 李中阳, 等. 再生水和养殖废水灌溉下土壤 - 植物系统养分和重金属迁移特征[J]. 灌溉排水学报, 2018,37(2):45 - 51.
[11] 王志超, 史海滨, 李仙岳, 等. 回填土下再生水灌溉对玉米生长及土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2016,30(1):196 - 202 + 277.
[12] WANG Jianhua, LU Shibao, PEI Liang, et al. Study on rules of dynamic variation of nitrogen in soil after reclaimed water drip irrigation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016,41(35):15938 - 15943.
[13] 胡 超, 徐国华, 齐学斌, 等. 再生水分根交替地下滴灌对马铃薯品质和重金属积累影响 [J]. 灌溉排水学报, 2011,30(3):43 - 46.
[14] 裴 亮, 周 翀, 梁 晶, 等. 再生水滴灌对作物品质和产量的影响研究——以菠菜为例[J]. 节水灌溉, 2013(7):7 - 9.
[15] 裴 亮, 孙莉英, 张体彬. 再生水滴灌对蔬菜根际土壤微生物的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(11):39 - 42.
[16] 裴 亮, 张体彬, 梁 晶, 等. 再生水滴灌土壤中氮素的动态变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013,41(1):70 - 74.
[17] 裴 亮, 刘荣豪, 薛 铸, 等. 再生水滴灌作物生育期内土壤氮素动态变化规律研究[J]. 水利水电技术, 2013,44(10):34 - 36 + 40.
[18] KANG Yaohu, WANG Fengxin, LIU Haijun, et al. Potato evapotranspiration and yield under different drip irrigation regimes[J]. Irrigation Science, 2004,23(3):133 - 143.
[19] 王凤新,康跃虎.用负压计拟定滴灌马铃薯灌溉计划的方法研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(3):58 - 64.
[20] 国家环境保护总局. 污水综合排放标准:GB 20426 - 2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.