

基于 GM(1,1) 模型群的农田土壤墒情短期预测

冀荣华¹ 李鑫¹ 张舒蕾¹ 郭敏英²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学理学院, 北京 100083)

摘要: 全面比较和分析了春玉米全生育期内土壤墒情的时空分布特征。结果表明,土壤墒情数据为非平稳时间序列,具有周期性;降水量是影响土壤墒情的重要环境因素,其影响规律具有较大随机性。以不同土层深度(10、30 cm,分别代表2种墒情变化情况)和春玉米不同生育期(4个)交叉组合的土壤墒情作为模型对象,基于 GM(1,1) 预测方法构建农田土壤墒情短期预测模型群。预测结果表明该子模型的预测精度均较高,平均相对误差均小于2%,其中以苗期10 cm处土壤含水率预测效果最佳。考虑降水量的影响,对模型群中参数 u 进行优化,使得所建土壤墒情短期预测模型群的预测更为准确有效。

关键词: 土壤墒情; GM(1,1)模型; 灰度关联分析; 模型群; 非平稳时间序列

中图分类号: TP391.4; S156.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0401-07

Short-term Prediction of Soil Moisture in Field Based on GM(1,1) Model Group

Ji Ronghua¹ Li Xin¹ Zhang Shulei¹ Guo Mingying²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The varying pattern of soil moisture in crop field environment was measured, analyzed and compared. The correlation coefficients between soil moisture and precipitation amount as well as between soil moisture and temperature were closely studied. The measured soil moisture data were non-stationary time series, which were quasi-periodic. The periodicity characteristic was varied with growth stages of spring maize. Precipitation amount was one of the most important stochastic environmental factors which interfered soil moisture. Oriented to this randomness feature, soil moisture was measured in different soil depths (10 cm and 30 cm, represented two typical types of soil moisture's fluctuation) at four different maize growth stages. The soil moisture data measured in 10 cm soil depth represented a volatile fluctuation, while that in 30 cm soil depth was relatively stable. A model group for short-term soil moisture prediction was introduced based on the GM(1,1) method. The model group was tested by using soil moisture data acquired from field. Results showed that compared with single prediction model, the prediction precision was evidently improved by corresponding sub-model of the model group. The overall mean relative error was less than 2% for the model group. Comparing results of different combinations in soil moisture prediction using the model group, the result at maize seedling stage in 10 cm soil depth was the best. Moreover, considering the influence of precipitation, parameter u in model group was optimized and adjusted, which further improved the performance of the model group for soil moisture prediction.

Key words: soil moisture; GM(1,1) model; grey correlation analysis; model group; non-stationary time series

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31101609)

作者简介: 冀荣华(1973—),女,副教授,博士,主要从事农业信息化研究,E-mail: jessie1212@cau.edu.cn

通信作者: 郭敏英(1973—),女,副教授,博士,主要从事数据分析与挖掘研究,E-mail: gminying@163.com

引言

准确、有效地预测土壤墒情,是实现精准灌溉、提高水资源利用率的基础^[1-2]。土壤墒情的研究主要集中在土壤墒情监测^[3-6]和预测预报^[7-22]方面。

针对土壤墒情的预测方法,主要是从时间和空间两个角度开展的。从时间角度预测土壤墒情,主要以土壤墒情的时间序列数据为研究对象,主要方法有神经网络^[7-10]、多元回归分析^[11-12]、支持向量机(SVM)^[14,20]等。王勇志等^[7]以不同时期的土壤墒情组合数据作为输入,建立基于BP神经网络的单因素土壤墒情预测模型。黄令森等^[8]则考虑了气候对土壤墒情的影响,结合缺省因子检验法,建立BP-ANN土壤墒情3因子预测模型。WEI等^[11]采用多元经验分解模型(EMD)对数据进行预处理,对不同的环境因素与土壤含水率进行线性回归分析,分别对加拿大草原地区和中国黄土高原地区的土壤墒情进行预测。JONATHAN等^[12]采用逐步多元回归分析预测新南威尔士州的葡萄园土壤墒情。从空间角度预测土壤墒情主要采用HYDRUS-1D^[13]、克里格法(KED)^[15-16]等。CHEN等^[13,18]利用HYDRUS-1D中自带的土壤水分模型对土壤墒情进行空间预测。研究表明,土壤类型和叶面积指数是影响模型预测精度的关键参数。LAMORSKI等^[14]对比了HYDRUS-1D自带模型和SVM模型,对表层的土壤墒情进行了长期预测。BARBARA等^[15]采用线性混合效应(LME)和外移的克里格空间插值法(KED),构建了土壤墒情预测模型。YANG等^[16]将地形变量作为克里格法辅助变量对喀斯特地区的土壤含水率进行空间预测,研究结果表明应用了交叉验证准则的KED模型,预测效果更好。

农田土壤墒情是复杂非线性耦合系统,与作物生长过程密切相关,且在不同生育期土壤墒情变化规律不同,而目前一些土壤墒情预测并未与作物生长相结合^[21-22]。而另一些则考虑了作物生长^[23-24],以作物整个生育期为研究背景,但未考虑作物在其整个生育期内各个阶段需水量的差异性。在土壤墒情中长期的预测过程中,土壤水分受环境变化、作物生长、灌溉调整等多种复杂因素的影响,造成预测结果存在较大偏差。土壤墒情短期预测是指根据前多少天的土壤墒情初始值和气候因素,预报次日的土壤墒情变化量。为此,本文提出结合春玉米生长周期内各个阶段的土壤墒情变化规律,对农田土壤墒情进行分阶段短期预测,即通过分析春玉米不同生育期、地表下不同深度土

壤墒情的时空分布特征,建立土壤墒情短期预测模型群。

1 材料与方法

1.1 种植区概况

试验在北京市海淀区上庄镇辛力屯村东上庄试验站(40°08'N,116°10'E)进行。耕层有机质质量比约为10.88 mg/kg,粉砂质潮土,表层土壤颗粒组成^[25]砂粒含量的变化范围较大,为1.54%~28.00%,而砂砾和粉粒含量的变化范围较小。表层土壤容重范围为1.01~1.58 g/cm³,适宜于农作物种植。该地区年平均降水量约600 mm,年平均气温11.6℃,年平均日照时数在2 200 h以上。该试验站以旱地种植为主,进行冬小麦-春玉米一年两作,试验选用春玉米“郑单958”,其单株玉米日耗水量^[26-27]符合“前期少,中后期偏多”规律。春玉米需水高峰期在拔节-抽穗期,一般在7月中下旬—8月中上旬。生长周期约为110~130 d,分布情况如表1所示。

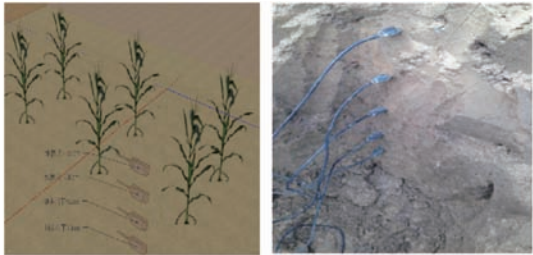
表1 春玉米生长周期
Tab.1 Growth cycle of spring maize

生育期	天数/d	日期区间
苗期	26	2015-05-30—2015-06-24
拔节期	35	2015-06-25—2015-07-29
抽穗期	21	2015-07-30—2015-08-19
灌浆期	28	2015-08-20—2015-09-16

1.2 数据获取

为有效掌握春玉米全生育期内大田土壤墒情在不同深度土层的空间分布规律。从试验站北区中划出一块平整且不易积水的试验小区,长约400 m,宽约30 m,划分为2×10个网格单元,间距约为10 m。在试验小区栽种“郑单958”春玉米,以小区网格单元为单位对土壤水分进行监测。期间,每个网格单元均无灌溉记录。张喜英^[28]指出春玉米最大根深1.2 m,80%以上的根系集中在0~40 cm土层中。为此,在每一个网格单元监测点均按照图1进行传感器布置,即5个土壤传感器埋设深度分别为10、20、30、40、50 cm。

土壤墒情采用美国ONSET公司生产的W-SMC型土壤水分传感器和U30-NRC型数据采集器测定。土壤水分传感器测量范围为0~1.00 m³/m³,精度为±0.031 m³/m³,工作温度为-20~50℃。数据采集器配有10个传感器接口和一个USB通讯接口,15个通道,数据存储量512 K,工作温度为-40~60℃,内部电池使用寿命6个月(可充电)。设置采样间隔为1 h。环境参数主要监测温度和降



(a) 示意图
(b) 实际布置图
图 1 土壤墒情传感器空间布置图

Fig. 1 Spatial arrangements of soil moisture sensors

水量,以上庄试验站提供的小型户外环境监测站数据为主,以中国气象数据网数据为补充。

1.3 研究方法

1.3.1 灰色关联分析

灰色关联分析是灰色系统理论的主要分析方法之一,用来分析系统中母因素和子因素的关系密切程度,从而判断引起该系统发展的主要和次要因素。

其基本原理是通过数据序列曲线发展态势(几何形状)的相似程度来判断序列联系是否紧密,其紧密程度用关联度量化,曲线越接近,数据序列之间的关联度越大,反之越小。

1.3.2 GM(1,1)建模方法

灰色预测方法是一种对含有不确定因素的系统进行预测的方法。其基本原理是通过对原始数据进行生成处理来寻找系统变动的规律,生成有较强规律性的数据序列,然后建立相应的微分方程模型,从而预测事物未来发展趋势的状况。GM(1,1)^[29-30]是灰色预测理论中典型的建模方法,其建模步骤如下:

(1)对原始序列 $X^{(0)}$ 作准光滑性检验和准指数检验,其计算式分别为

$$\rho(k) = \frac{x^{(0)}(k)}{x^{(1)}(k-1)} \tag{1}$$

$$\sigma^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k)}{x^{(1)}(k-1)} \tag{2}$$

(2)对原始序列 $X^{(0)}$ 作一次累加生成处理,得到新数列

$$X^{(1)}(k) = \sum_{n=1}^k X^{(0)}(n) \tag{3}$$

(3)新数列 $X^{(1)}$ 的变化趋势可近似描述为微分方程

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u \tag{4}$$

式中 a ——发展灰数 u ——内生控制灰数

(4)模型求解

预测模型可表示为

$$Y_n = B\hat{\alpha} \tag{5}$$

其中 $Y_n = [X^{(0)}(2) \quad X^{(0)}(3) \quad \cdots \quad X^{(0)}(n)]^T$ (6)

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\hat{\alpha} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中 $\hat{\alpha}$ ——待估参量

利用最小二乘法求解可得

$$\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \tag{9}$$

根据参数向量,即可得到离散时间响应函数

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = \left(\hat{X}^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right) e^{-at} + \frac{u}{a} \tag{10}$$

其中 $\hat{X}^{(1)}(t+1)$ 为所得的累加预测值,将预测值还原可得

$$\hat{X}^{(0)}(t+1) = \hat{X}^{(1)}(t+1) - \hat{X}^{(1)}(t) \tag{11}$$

(5)模型检验

灰色预测模型的检验方法采用残差检验和后验差检验。残差检验的过程是分别求出预测值、绝对误差和相对误差,然后计算平均相对误差(Mean relative error, MRE)来判断模型的预测精度。后验差检验方法主要计算小误差概率 P 值,然后对照检验指标 T 值与灰色预测精度等级标准,如表 2 所示。

表 2 检验指标 T 值与灰色预测精度检验等级标准
Tab.2 T -value and grey prediction accuracy standard

检验指标	1 级(优)	2 级(良)	3 级(中)	4 级(差)
T 值	>0.85	0.75~0.85	0.65~0.75	0.50~0.65

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

试验区土壤墒情的描述性统计结果见表 3。对原始序列进行 K-S 正态检验, P 值均小于 0.05,说明土壤墒情不符合正态分布。在春玉米全生育期, 10~20 cm 土层变异系数较大,反映出表层土壤墒情受环境因素、根系分布情况影响更大。30~50 cm 土层变异系数较小,反映出深层土壤墒情性质较为稳定。因此,对 10 cm(波动较大)和 30 cm(波动较小)处土壤墒情进行预测。

2.2 平稳性分析

为明晰土壤墒情时间序列特点,采用选取时序图和单位根检验方法对土壤墒情时间序列进行平稳性检验。图 2 为 2015 年春玉米全育期的土壤墒情时序图。可见在玉米生育期内,土壤墒情波动幅度

表3 种植区土壤墒情的描述性统计结果

Tab.3 Descriptive statistics of soil moisture in crop-growing region

样本序号	采样深度/cm	变异系数/%	P 值
1	10	9.492	<0.01
2	20	9.007	<0.01
3	30	4.400	<0.01
4	40	5.724	<0.01
5	50	5.917	<0.01

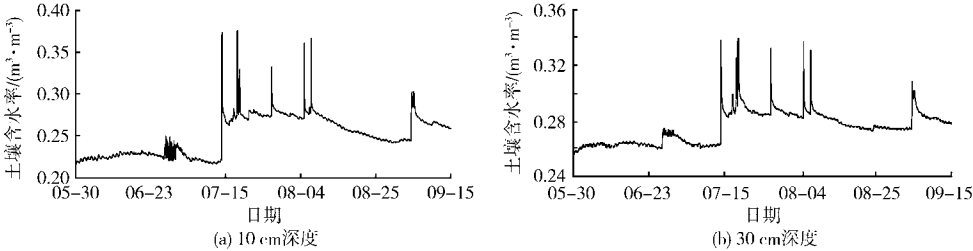


图2 2015年春玉米全生育期内土壤墒情时序图

Fig.2 Time sequence diagrams of soil moisture in whole growth period of spring maize in 2015

表4 单位根检验结果

Tab.4 Inspection results of unit root

采样深度/cm	10	20	30	40	50
P 值	0.480 0	0.279 9	0.602 6	0.497 4	0.408 1

和灌浆期)的土壤墒情时间序列进行离散傅里叶变换,分析其时频特性,并将每个生育期的前10个明显特征频率转换成天数,图3为4个生育期土壤墒情周期图。对比各图曲线,可见10 cm和30 cm采样位置的峰值较高处均存在明显的一致性,即同一生育期内不同深度土壤墒情具有相似的周期性变化规律;而不同生育期的周期性变化规律则存在一定差异。图3中土壤墒情在4个生育期的最大特征周期分别为14.23、6.09、7.11、10.67 d。

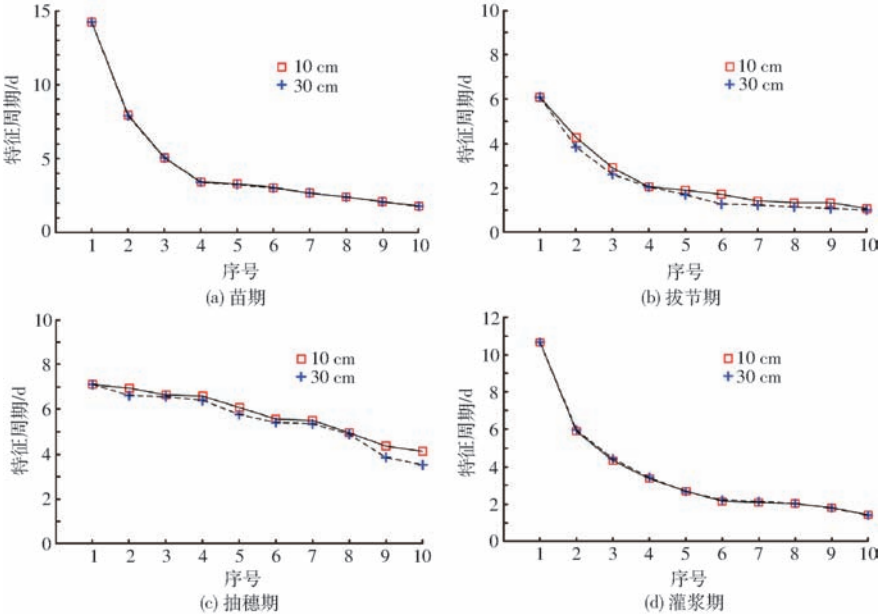


图3 春玉米4个生育期的土壤墒情周期图

Fig.3 Periodograms of soil moisture at four growth stages of spring maize

较大,尤其是在春玉米拔节期与抽穗期,由平稳性定义可知,土壤墒情时间序列是非平稳的。同时,根据单位根检验结果(表4)可以发现,P值均大于 α ($\alpha=0.05$),即接受原假设,也即土壤墒情属于非平稳时间序列。

2.3 分段周期性分析

为探索春玉米不同生育期土壤墒情时间序列特点,分别对表1中4个生育期(苗期、拔节期、抽穗期

2.4 气候因素与土壤墒情的灰度相关性分析

为探明气候因素对土壤墒情的影响,分别计算春玉米4个生育期内不同深度土壤墒情(10 cm和30 cm)与2个气候因素(降水量和气温)的灰色关联度。结果如表5所示。其中,S为苗期,J为拔节期,H为抽穗期,GF为灌浆期;S-10代表苗期10 cm处的土壤墒情。可以发现降水量与土壤墒情具有较大关联度,即降水量对土壤墒情具有较大影响,尤其苗期影响最大。

土壤墒情时间序列数据为非平稳时间序列;在春玉米不同生育期的土壤墒情具有不同周期的变化;降水量对土壤墒情有着较大影响,且影响规律不确定。灰色预测适用于不确定性系统预测,因此,采

用灰色 GM(1,1) 预测方法分别对不同生育期土壤墒情进行短期预测。

表 5 气候因素与土壤墒情的灰度相关系数
Tab.5 Grey correlation coefficient of climate factors and soil moisture

土壤墒情编号	降水量	气温
S-10	0.987 9	0.337 2
J-10	0.983 4	0.336 3
H-10	0.980 2	0.337 3
GF-10	0.981 8	0.337 2
S-30	0.997 7	0.341 5
J-30	0.978 7	0.336 0
H-30	0.977 8	0.336 8
GF-30	0.978 2	0.336 9

2.5 灰色 GM(1,1) 土壤墒情模型群及预测效果评价

利用土壤墒情时间序列来构造灰色 GM(1,1) 预测模型,以预测未来 1 d 的土壤墒情。构建步骤如下:

(1)数据验证。通过对土壤墒情时间序列数据进行准光滑性检验和准指数检验,判断灰色 GM(1,1)是否适用于土壤墒情预测。由表 6 可知,当 $k > 3$ 时,土壤墒情满足准光滑和准指数条件,即灰色 GM(1,1)模型适用于土壤墒情时间序列数据。

表 6 数据验证结果
Tab.6 Verification results of soil moisture data

参数	数值		
k	3	4	5
ρ	1.00	0.34	0.25
σ	1.50	1.34	1.25

(2)模型设计。为精准预测春玉米不同生育期不同深度的土壤墒情,将 4 个生育期和 2 个土层深度进行交叉组合构建 4×2 的 GM(1,1)时空预测模型群,分别为 SM-10(30)、JM-10(30)、HM-10(30)和 GFM-10(30)模型。其中,SM-10 代表苗期 10 cm 处土壤墒情预测模型。参照春玉米不同生育期的周期信息,模型训练期设置为 x , x 分别取 2、3、5、7、10 d,而预测期设为第 $(x+1)$ 天。

(3)模型数据处理。对模型群中每个模型所对应的原始土壤墒情时间序列数据进行累加生成处理,得到新的数列 $X^{(1)}$,利用最小二乘法进行参数求解,得到最终的预测模型。

(4)模型检验。分别利用残差检验和后验差检验。对应的评价指标选择平均相对误差 (MRE) 和后验差指标 T 值。

表 7 中各子模型的 MRE 均小于 2%,即所建土

壤墒情预测模型预测效果较好。所有的模型 T 值均大于 0.75,即所建模型的预测精度均符合要求。不同土层深度的土壤墒情预测模型所选择的训练期不同,10 cm 预测模型训练期选为 3~5 d,而 30 cm 预测模型的训练期选为 7~10 d。

表 7 土壤墒情时空预测模型群
Tab.7 Model group of soil moisture's short-term forecasting

模型	参数		训练期 x/d	第 $(x+1)$ 天预测 效果评价指标	
	a	u		MRE/%	T 值
SM-10	-4.35×10^{-5}	0.222 2	3	1.00	0.958 3
SM-30	2.23×10^{-5}	0.262 6	7	0.18	0.875 0
JM-10	1.49×10^{-4}	0.276 7	5	0.27	0.875 0
JM-30	8.37×10^{-5}	0.285 8	10	1.55	0.875 0
HM-10	3.95×10^{-4}	0.266 0	3	0.24	0.750 0
HM-30	1.95×10^{-4}	0.281 1	10	0.11	0.875 0
GFM-10	3.51×10^{-4}	0.277 3	5	0.08	0.916 7
GFM-30	9.49×10^{-5}	0.275 7	7	0.07	0.916 7

上述所建模型群在不考虑环境气候因素影响的情况下,即可直接对土壤墒情时间序列数据进行预测。进一步通过灰度关联分析发现,降水量对土壤墒情具有较大影响,为此本文以最小化 MRE 为优化目标。需考虑前后有降水情况的 x ,重新遍历每个生育期的墒情数据,得到所建模型群中离散时间响应函数的参数 u 的最优值范围。其优化结果见表 8。

表 8 参数 u 优化结果
Tab.8 Optimization result of parameter u

模型	参数 u 调整范围/%
SM-10	1.8~3.6
SM-30	1.5~2.2
JM-10	2.2~3.2
JM-30	1.7~2.4
HM-10	3.0~3.7
HM-30	3.9~4.6
GFM-10	3.2~4.3
GFM-30	3.6~4.3

3 结论

(1)土壤墒情时间序列数据是非平稳的。

(2)土壤墒情在作物不同生育期内具有周期性规律。同一生育期但不同深度的土壤墒情的变化周期一致;不同生育期土壤墒情变化周期不同,即分段建模可较为精准地预测土壤墒情。

(3)灰度关联分析发现,相对于其他生育期在春玉米苗期阶段,降水量与土壤墒情具有较大的关联度。

(4)建立分段土壤墒情短期预测模型群。预测

结果表明,其平均相对误差均在2%以内,检验指标 T 值均在0.75以上。土层深度10 cm的模型以3~5 d为训练期的预测模型精度较高;30 cm的模型以

7~10 d为训练期的预测模型精度较高。

(5)由于降水量对土壤墒情影响较大且较明显,对预测模型参数 u 进行调整,可得到其优化结果。

参 考 文 献

- 孙景生,康绍忠. 我国水资源利用现状与节水灌溉发展对策[J]. 农业工程学报,2000,16(2): 1-5.
SUN Jingsheng, KANG Shaozhong. Present situation of water sources usage and developing countermeasures of water-saving irrigation in China[J]. Transactions of the CSAE,2000,16(2): 1-5. (in Chinese)
- 蔡甲冰,刘钰,雷廷武. 精量灌溉决策定量指标研究现状与进展[J]. 水科学进展,2004,15(4): 531-537.
CAI Jiabing, LIU Yu, LEI Tingwu. Review of indices precision irrigation decision-making[J]. Advance in Water Science,2004,15(4): 531-537. (in Chinese)
- 陈天华,唐海涛. 基于ARM和GPRS的远程土壤墒情监测预报系统[J]. 农业工程学报,2012,28(3): 162-166.
CHEN Tianhua, TANG Haitao. Remote monitoring and forecasting system of soil moisture based on ARM and GPRS[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(3): 162-166. (in Chinese)
- 魏义长,王振营,王同朝,等. 土壤墒情实时监测与精准灌溉系统的设计[J]. 农业工程学报,2013,29(17): 80-86.
WEI Yichang, WANG Zhenying, WANG Tongchao. Design of real time soil moisture monitoring and precision irrigation systems[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(17): 80-86. (in Chinese)
- 李小涛,黄诗峰,宋小宁,等. 卫星遥感结合地面观测数据的土壤墒情监测分析系统[J]. 水利学报,2013,44(增刊1): 116-120.
LI Xiaotao, HUANG Shifeng, SONG Xiaoning, et al. Soil moisture monitoring and analysis system based on satellite remote sensing and ground observation data[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(Sup. 1): 116-120. (in Chinese)
- ANDREW J, NATHANIEL K, STEVE H L. Integrated sensing of soil moisture at the field-scale; measuring, modeling and sharing for improved agricultural decision support[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2014,107(3): 73-88.
- 王勇志,赵燕东,马扬飞. 单因素土壤墒情预测模型研究[J]. 灌溉排水学报,2013,32(2): 134-137.
WANG Yongzhi, ZHAO Yandong, MA Yangfei. The study on soil moisture forecast with single factor[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2013,32(2): 134-137. (in Chinese)
- 黄令森,任树梅,杨培岭,等. 基于缺省因子的BP-ANN土壤墒情预报简化模型[J]. 中国农业大学学报,2013,18(5): 166-172.
HUANG Lingmiao, REN Shumei, YANG Peiling, et al. Soil moisture forecast BP-ANN model and simulation based on sensitivity analysis[J]. Journal of China Agricultural University,2013,18(5): 166-172. (in Chinese)
- 李文峰. BP神经网络在许昌土壤墒情预测模型的应用[J]. 中国农学通报,2013,29(32): 238-241.
LI Wenfeng. BP neural network in Xuchang soil moisture prediction model[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2013,29(32): 238-241. (in Chinese)
- 白冬妹. 黄土丘陵半干旱地区柠条林地土壤水分预测模型研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
BAI Dongmei. The forecast model study of soil water content in semi-arid region of the loess plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University,2014. (in Chinese)
- WEI Hu, BING Chengsi. Soil water prediction based on its scale-specific control using multivariate empirical mode decomposition[J]. Geoderma,2013,193-194: 180-188.
- JONATHAN E H, ASIM B. Predicting the mobile water content of vineyard soils in New South Wales, Australia[J]. Agricultural Water Management,2015,148: 34-42.
- CHEN Min, WILL G, GARRY R, et al. Spatial prediction of temporal soil moisture dynamics using HYDRUS-1D[J]. Hydrological Processes,2014,28(2): 171-185.
- LAMORSKI K, PASTUSZKA T, KRZYSZCZAK J, et al. Soil water dynamic modeling using the physical and support vector machine methods[J]. Vadose Zone Journal,2013,12(4): 1742-1751.
- BARBARA C, ANNAMARIA C, DANIELA D B, et al. A linear mixed effect (LME) model for soil water content estimation based on geophysical sensing: a comparison of an LME model and Kriging with external drift[J]. Environmental Earth Sciences,2015,73(5): 1951-1960.
- YANG Qiyong, JIANG Zhongcheng, MA Zulu, et al. Spatial prediction of soil water content in karst area using prime terrain variables as auxiliary cokriging variable[J]. Environmental Earth Sciences,2014,72(11): 4303-4310.
- CHEN Min, WILL G, GARRY R, et al. Investigating the impact of leaf area index temporal variability on soil moisture predictions using remote sensing vegetation data[J]. Journal of Hydrology,2015,522: 274-284.
- 邓建强,陈效民,方堃,等. 基于神经网络的混沌时间序列土壤墒情预测预报[J]. 水土保持通报,2008,28(6): 82-85.
DENG Jianqiang, CHEN Xiaomin, FANG Kun. Prediction of chaotic soil moisture time series based on artificial neural network[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2008,28(6): 82-85. (in Chinese)
- VERECKEN H, HUISMAN J A, PACHEPSKY Y, et al. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale[J].

- Journal of Hydrology,2014,516: 76 – 96.
- 20 LU Jiak, WANG Xuan, WANG Chenqiu, et al. Soil moisture content prediction using wavelet transform and support vector machine with genetic algorithm optimization[J]. ICIC Express Letters,2014,5(4): 1141 – 1148.
- 21 刘秀英,王力,宋荣杰,等. 黄绵土风干过程中土壤含水率的光谱预测[J]. 农业机械学报,2015,46(4):266 – 272.
LIU X Y, WANG L, SONG R J, et al. Prediction of soil moisture content in air-drying loess using spectral data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(4): 266 – 272. (in Chinese)
- 22 EUNSANG C, MINHA C. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula[J]. Journal of Hydrology,2014,516: 317 – 329.
- 23 毛飞,任三学,孙涵. 北方夏玉米农田土壤水分预测模型的研究[J]. 西北农林科技大学学报,2009,37(8): 145 – 153.
MAO Fei, REN Sanxue, SUN Han. Study on soil moisture prediction models of summer maize field in northern China[J]. Journal of Northwest A&F University,2009,37(8): 145 – 153. (in Chinese)
- 24 郑和祥,史海滨,柴建华. 非充分灌溉青贮玉米土壤墒情预报的人工神经网络模型[J]. 灌溉排水学报,2006,25(6): 53 – 56.
ZHENG Hexiang, SHI Haibin, CHAI Jianhua. Artificial neural network model for soil moisture forecast in inadequate irrigation of maize harvested green field[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2006,25(6): 53 – 56. (in Chinese)
- 25 胡克林,李保国,吕贻忠. 中国农业大学上庄试验站土壤理化性质的空间分布特征[J]. 中国农业大学学报,2006,11(6): 27 – 33.
HU Kelin, LI Baoguo, LÜ Yizhong. Spatial variation of physico-chemical properties in Shangzhuang experimental station of China Agricultural University[J]. Journal of China Agricultural University,2006,11(6): 27 – 33. (in Chinese)
- 26 张振华,蔡焕杰,杨润亚. 沙漠绿洲灌区膜下滴灌作物需水量及作物系数研究[J]. 农业工程学报,2004,20(5): 97 – 100.
ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, YANG Runya. Water requirements and crop coefficients of drip-irrigated crop under mulch in Minqin county oasis[J]. Transactions of the CSAE,2004,20(5): 97 – 100. (in Chinese)
- 27 肖俊夫,刘占东,陈玉民. 中国玉米需水量与需水规律研究[J]. 玉米科学,2008,16(4): 21 – 25.
XIAO Junfu, LIU Zhandong, CHEN Yumin. Study on the water requirement and water requirement regulation of maize in China [J]. Journal of Maize Sciences,2008,16(4): 21 – 25. (in Chinese)
- 28 张喜英. 作物根系与土壤水分利用[M]. 北京:气象出版社,1999.
- 29 杨华龙,刘金霞,郑斌. 灰色预测 GM(1,1)模型的改进及应用[J]. 数学的实践与认识,2011,41(23): 39 – 46.
YANG Hualong, LIU Jinxia, ZHENG Bin. Improvement and application of grey prediction GM(1,1) model[J]. Mathematics in Practice and Theory,2011,41(23): 39 – 46. (in Chinese)
- 30 秦琳琳,马国旗,储著东. 基于灰色预测模型的温室温湿度系统建模与控制[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊1): 233 – 240.
QIN Linlin, MA Guoqi, CHU Zhudong. Modeling and control of greenhouse temperature-humidity system based on grey prediction of disturbance inputs[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(Supp. 1): 223 – 240. (in Chinese)