

基于小波消噪的三江平原低湿地月降水时间序列分析

刘东,付强

(东北农业大学 水利与建筑学院,哈尔滨 150030)

摘 要:近年来,由于水田面积迅速增加,导致三江平原低湿地井灌水稻区地下水位普遍下降,“吊泵”、局部超采现象时有发生,因此,三江平原地下水资源动态平衡急需恢复。为解决上述问题,以853农场为例,对实测逐月降水资料进行消噪、差分和标准化处理,建立了逐月降水量季节性时序预测模型,精度检验结果表明,模型有效性和可靠性较高。该模型揭示了区域逐月降水量的时间变化规律,为853农场乃至整个三江平原充分利用天然降水、合理制定水稻灌溉制度以及地下水资源的恢复和可持续利用提供了科学依据。

关键词:三江平原;井灌水稻;逐月降水量;小波消噪;季节性时序模型

中图分类号:P426.614

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)02-0164-04

Monthly Precipitation Time-series Analysis of Low-lying Wetland in Sanjiang Plain Based on Wavelet Denoising

LIU Dong, FU Qiang

(College of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The rapid increase of paddy field area has led to widely descending of groundwater level in well irrigation paddy area of low-lying wetland in Sanjiang Plain in recent years. More and more “hanging pump” and partial overpumping have occurred in this area. Therefore, the groundwater resources dynamic balance needs to be recharged urgently in Sanjiang Plain. In order to solve above-mentioned problems, taking Farm 853 as example, the monthly precipitation seasonal time-series forecasting model was built up after the denoising, difference and standardization treatment towards the actual observation monthly precipitation data. The results of precision test showed this model had upper validity and reliability. The authors consider that the model built in this paper can reveal the time variation regularities of monthly precipitation in this area, and can provide scientific gist for fully utilizing natural precipitation, reasonably establishing irrigation system of paddy, groundwater resource recharge and sustainable utilization in Farm 853 so much as the entire Sanjiang Plain.

Key words: Sanjiang Plain; well irrigation paddy; monthly precipitation; wavelet denoising; seasonal time-series model

三江平原位于黑龙江省东部,为黑龙江、松花江、乌苏里江冲积平原,面积10.9万 km^2 ,耕地面积366.77万 hm^2 ^[1],是国家重要的商品粮基地。三江平原地势低平,大部分地区土壤质地黏重,排水能力差,很容易形成涝灾而减产。因此,为了改良低湿地,从20世纪80年代开始,三江平原开始种植水稻,实现“以稻治涝”,取得了显著的效益。从1981—2000年,三江平原水稻种植面积从7万 hm^2 激增到95.3万 hm^2 ^[2]。由于水田面积迅速增加,地下水开采量也迅速增加,再加上人为浪费严重以及管理不善,使得三江平原地下水位普遍下降,“吊泵”和局部超采现象时有发生,三江平原地下水资源的动态平衡受到了严重的破坏。地下水位下降已经导致三江平原产生了地下水降落漏斗形成、地面沉降、水质恶化等一系列水环境问题,同时考虑到在三江平原开展大规模的地下水人工补给实践在短期内是难以实现的,因此,从实用角度来看,应大力加强三江平原地下水自然补给

研究。大气降水是地下水最主要的自然补给来源。三江平原多年平均降水量为560 mm左右,降水年际变化大,年内分配很不均匀^[3]。因此,研究三江平原井灌水稻区的降水规律,对未来降水进行预测,对于合理制定水稻灌溉制度、节约地下水资源、地下水资源的恢复以及农业和地下水资源的可持续发展具有重要的意义。

降水量预测有多种方法,文献[4]至[9]采用马尔可夫模型、时间序列分析方法、灰色系统理论、人工神经网络技术等方法对区域降水量进行了预测。降水过程属于非平稳随机过程,降水序列一般具有明显的以年为周期的规律性,属于季节时间序列。以853农场为例,建立基于小波消噪的853农场逐月降水季节性时序模型。

1 水文序列小波消噪

实测水文序列由于各种因素的干扰,不可避免地含有系

收稿日期:2007-06-06

基金项目:国家自然科学基金项目(30400275)

作者简介:刘东(1972—),男,副教授,博士,主要从事农业水土资源系统分析与优化利用研究。E-mail:liu72dong@126.com

通信作者:付强(1973—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事农业水土资源系统分析与优化利用研究。

统噪声和测量噪声。噪声淹没了水文序列的真实变化规律,若采用含有噪声的水文序列进行分析计算,将影响数据的可靠性和数据分析成果的精度。因此在应用水文时间序列数据建模之前,应首先对序列进行消噪处理。

1.1 小波消噪原理

对于某一实测水文序列 $x(t)$,一般由两部分构成,一部分是有助于了解水文现象特性的有序序列 $s(t)$, $s(t)$ 通常表现为低频信号或一些较平稳信号,另一部分是阻碍了解和掌握 $s(t)$ 特性的噪声序列 $e(t)$, $e(t)$ 通常表现为高频信号。小波分析可以有效地分离高频和低频信号。根据不同信号在小波变换后所表现出的不同特性,对小波分解序列进行处理,再将处理后的序列进行重构,就可以实现信噪分离^[10]。

1.2 小波消噪步骤

目前,小波消噪的主要方式是采用 20 世纪 90 年代 Donoho 等人提出的阈值消噪方法^[11]。实测水文序列 $x(t) = s(t) + e(t)$ 。设 X 为 $x(t)$ 的小波变换,则 Donoho 非线性阈值消噪方法的主要步骤为^[10,12]:

(1) 对序列 $x(t)$ 进行 N 层小波变换,求得 X 。

(2) 采用硬阈值或软阈值处理方法对变换系数进行阈值处理。

(3) 计算小波变换的逆变换,进行小波重构,得到消噪序列 $s(t)$ 。

2 建立季节性时序模型的一般步骤

常用的季节性时序模型(周期为 12 个月)的一般形式为^[13-17]:

$$(1 - B^{12})X_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \theta_{12} B^{12})\epsilon_t \quad (1)$$

式中: B ——后移算子; θ ——滑动平均系数; ϵ ——残差项。建立季节性时序模型的主要步骤为(以 MA(q) 模型为例):

(1) 对时间序列进行季节差分,得到一个平稳序列。对于在均值上不平稳的水文序列,通常只需差分一次即可达到平稳。

(2) 对差分后序列进行自相关和偏相关分析,初步选定模型类型。

(3) 利用自相关分析的结果,判定模型阶数。

当 $k > q$ 时, $r_k \approx 0$, r_k 的分布将渐近于正态分布,即 $r_k \sim n[0, \frac{1}{n}(1 + 2\sum_{i=1}^q r_i^2)]$,根据正态分布的性质有:

$$P(|r_k| \leq \frac{1.96}{\sqrt{n}}(1 + 2\sum_{i=1}^q r_i^2)^{\frac{1}{2}}) = 95\% \quad (2)$$

利用式(2)来判定模型阶数。对于每一个 $q > 0$,分别检查 $r_{q+1}, r_{q+2}, \dots, r_{q+M}$ (通常取 $M = \sqrt{n}$) 中符合式(2)不等式的个数是否达到 95%。如果在某一阶数 q_0 之前, $r_k \neq 0$,而在 $q = q_0$ 时, $r_{q_0+1}, r_{q_0+2}, \dots, r_{q_0+M}$ 中符合式(2)不等式的个数达到 95%,则可判定 r_k 在 q_0 处截尾,模型阶数为 q_0 ,即属于 MA(q_0) 模型。

(4) 估计模型参数。MA(q) 模型参数的估计就是确定序列的均值 \bar{X} 、方差 σ^2 、滑动平均系数 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$, 及残差序列方差 σ_ϵ^2 。序列的均值 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, 方差 $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i -$

$\bar{X})^2$ 。当 $q \leq 2$ 时,滑动平均系数和残差序列方差可以采用解析法进行计算,而当 $q \geq 3$ 时,需要采用线性迭代法进行计算,计算公式如下

$$\sigma_\epsilon^2 = \frac{\sigma^2}{1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2}$$

$$\theta_k = -\frac{r_k \sigma^2}{\sigma_\epsilon^2} + \theta_1 \theta_{k+1} + \dots + \theta_{q-k} \theta_q \quad (k = 1, 2, \dots, q) \quad (3)$$

(5) 模型阶数进一步判定。MA(q) 模型阶数 q 初步确定后,还需要采用 AIC 准则(也可以采用 BIC 等准则)进一步识别 MA(q) 模型的阶数是否合适,即

$$AIC(p, q) = \ln(\sigma_\epsilon^2) + \frac{2(p+q+1)}{n} \quad (4)$$

对于 MA(q) 模型, $p=0$,根据不同的阶数 q ,计算出相应的 AIC(0, q),其中,使得 AIC(0, q) 达到最小值的相应阶数即为所求。

(6) 模型检验。主要是检验残差项 ϵ_t 是否为独立序列。对于 MA(q) 模型,残差序列 ϵ_t 可以采用递推方法求得。计算残差序列 ϵ_t 的自相关系数 $r_k(\epsilon)$,构造统计量 $Q = n \sum_{k=1}^m r_k^2(\epsilon)$,式中, m ——最大滞时, Q 渐近服从自由度为 $m-p-q$ 的 χ^2 分布。若 $Q \leq \chi_{0.05}^2$,则残差项 ϵ_t 为独立序列。

(7) 模型精度检验。按照上述方法建立降水量季节时序模型后,在实际应用之前,还需要进行精度检验,具体方法可参考文献[16], [17]。若各项精度评价指标均满足要求,则所建模型的有效性和预测精度较高,可用于降水量预测,否则需要调整参数,对模型进行分析、修正。

3 应用实例

853 农场位于黑龙江省三江平原东部,隶属于黑龙江省农垦总局红兴隆分局,土地总面积 1 165.7 km²,其中耕地面积 581.35 km²。853 农场是一个以种植小麦、豆类、玉米、水稻为主的大型机械化国营农场,从 1991—2000 年,853 农场的水田面积由 0.61 万 hm² 激增到 2.67 万 hm² (72% 为井灌水稻)。据调查,853 农场从 1991—1998 年 8 a 间,地下水位年平均降幅为 0.3 m/a,从 1999—2004 年 6 a 间,地下水位年平均降幅为 0.7 m/a 左右。地下水位的持续下降已经严重破坏了当地地下水资源的供需平衡。为了充分利用天然降水、节约地下水资源及实现地下水资源的可持续利用,以 853 农场为例,对 853 农场 1959—2004 年的降水实测序列资料($n=46 \times 12=552$ 个月)进行分析,据上述建模理论,建立基于小波消噪的 853 农场逐月降水季节性时序模型。

3.1 实测逐月降水序列消噪

对 853 农场逐月降水量实测序列(见图 1(a))进行 3 次 Mallat 算法分解,小波函数采用 Symlets8 正交小波,采用 heursure 启发式方法估算小波分解系数的阈值,利用软阈值方法进行消噪,再利用 Mallat 算法进行重构,即可得到消噪后逐月降水序列 P'_t ($t=1, 2, \dots, 552$),见图 1(b)。图 1(c)为 853 农场逐月降水噪声序列的变化曲线。上述过程可以借助 Matlab7.0 软件编程来进行,以简化计算过程。

3.2 逐月降水消噪序列的平稳化

从图 1(b)可以看出,逐月降水消噪序列 P'_t 为一非平稳

序列,同时 P'_t 具有非常明显的以年(12个月)为周期的变化规律,因此可以对序列 P'_t 进行季节差分,由于 P'_t 在均值水平上不平稳,因此认为只需对其进行一次差分即可达到平稳,即

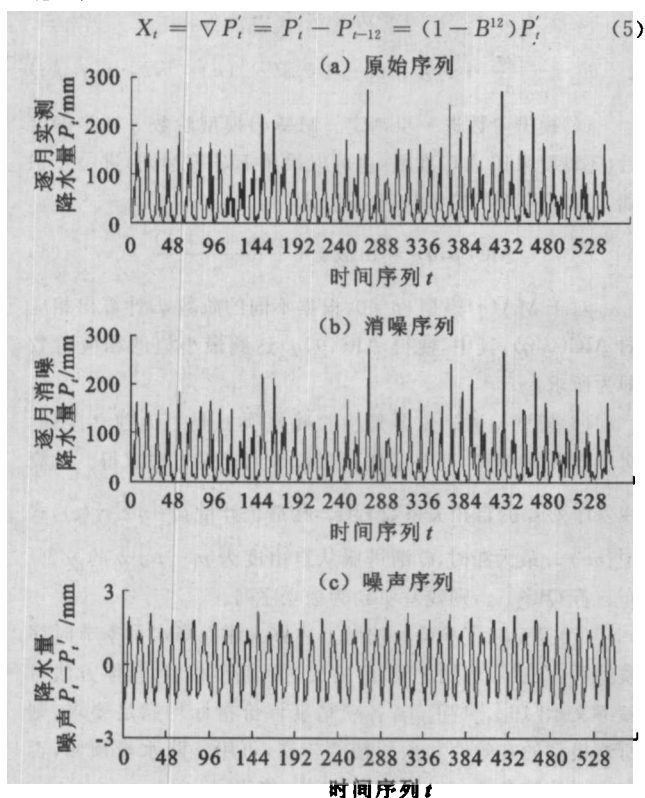


图1 853农场逐月降水量序列启发式软阈值方式消噪(1959—2004年)

通过差分,使得逐月降水消噪序列 P'_t 由非平稳序列转化为平稳序列 X_t ,见图2。

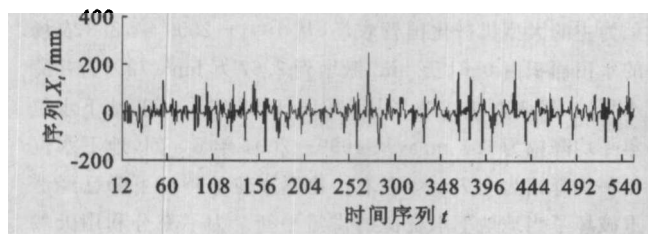


图2 差分后逐月降水消噪序列变化

3.3 差分后逐月降水消噪序列的标准化处理

由于差分后逐月降水消噪序列 X_t 样本数量较大($n=540$),为了保证计算精度,对序列 X_t 进行标准化处理,即 $X'_t = (X_t - \bar{X}_t) / \sigma_X$ ($\bar{X}_t = -0.3111, \sigma_X = 43.1208$),见图3。

3.4 建立差分后逐月降水消噪标准化序列随机模型

3.4.1 正态性检验

通过计算机编程计算,差分后逐月降水消噪标准化序列 X'_t 的均值 $\bar{X}' = 4.1119 \times 10^{-18} \approx 0$,方差 $\sigma^2 = 1.0000$,偏态系数 $C_{sk} = 0.2381$,所以序列 X'_t 近似于正态分布,不必进行正态性转化。

3.4.2 自相关分析

参考有关文献,样本数 $n=540$,取最大时移 $m=n/9=540/9=60$ 。通过编程计算序列 X'_t 的自相关系数,并绘制自

相关图,在自相关图上加绘置信水平为95%(显著性水平 $\alpha=0.05$)的容许限,见图4。由图4可以看到序列 X'_t 的自相关图具有截尾性,即在 $k=12$ 时 r_k 出现最大值, $k>12$ 时, r_k 基本上落在95%容许限范围内,因此,可以初步判定序列 X'_t 不属于 $AR(p)$ 模型,具体采用什么模型还应进一步进行偏相关分析。

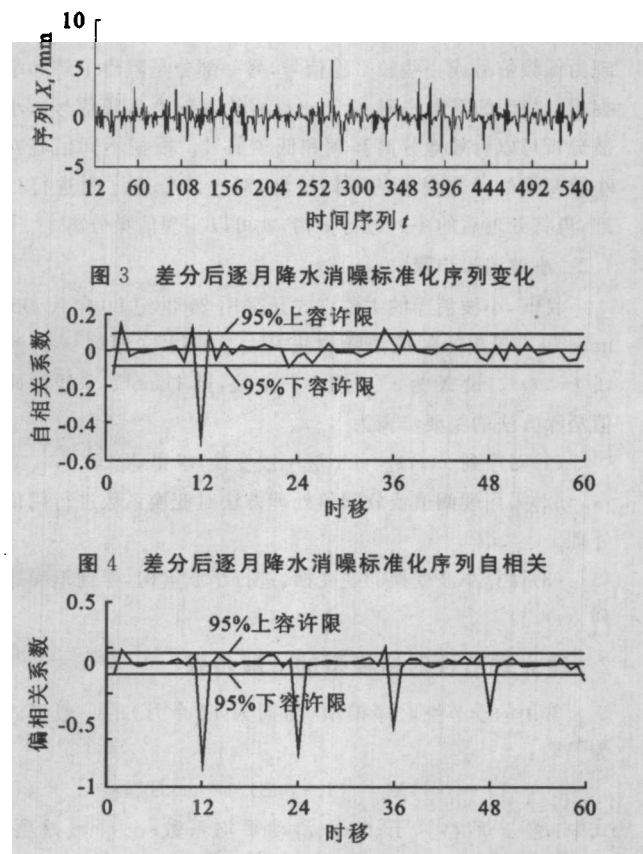


图5 差分后逐月降水消噪标准化序列偏相关

3.4.3 偏相关分析

采用尤尔-沃尔克估计法,编程计算序列 X'_t 的偏相关系数 φ_k ,并绘制偏相关图,在偏相关图上加绘置信水平为95%的容许限,见图5。由图5可以看到偏相关图具有明显的拖尾性,即在 $k=12$ 时 φ_k 出现最大值, $k>12$ 时, φ_k 随阶数的增加而逐渐减小,呈拖尾状,逐渐衰减地趋向于0。再根据自相关图具有截尾性特征,可以初步判定模型形式为滑动平均模型 $MA(q)$ 。

3.4.4 模型阶数判定

利用式(2)来判定模型阶数。取 $M = \sqrt{540} \approx 23$,采用计算机编程,计算结果见表1。由表1可知, r_k 在 $q=12$ 处截尾,模型阶数为12,即属于 $MA(12)$ 模型。

3.4.5 模型参数估计

序列 X'_t 的均值、方差见前述。本文 $q=12$,故采用线性迭代法估算滑动平均系数 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 和残差序列方差 σ_ϵ^2 。根据式(2),采用 Matlab 7.0 编程进行计算,得到 $MA(q)$ 模型参数为: $\theta_{12} = 0.8219, \sigma_\epsilon^2 = 0.5650$ 。因此,所需构建滑动平均模型为

$$X'_t = \epsilon_t - \theta_{12} \epsilon_{t-12} = \epsilon_t - 0.8219 \epsilon_{t-12} \quad (6)$$

表1 MA(q)模型阶数判定

q	1	2	3	4	5	6	7
$\frac{1.96}{\sqrt{n}}(1+2\sum_{i=1}^q r_i^2)^{\frac{1}{2}}$	0.0860	0.0877	0.0878	0.0878	0.0878	0.0878	0.0878
$P\{ r_k \leq \frac{1.96}{\sqrt{n}}(1+2\sum_{i=1}^q r_i^2)^{\frac{1}{2}}\}$	0.7826	0.8261	0.8261	0.8261	0.8261	0.8261	0.8261
p	8	9	10	11	12	13	14
$\frac{1.96}{\sqrt{n}}(1+2\sum_{i=1}^q r_i^2)^{\frac{1}{2}}$	0.0878	0.0878	0.0882	0.0893	0.1067	0.1072	0.1075
$P\{ r_k \leq \frac{1.96}{\sqrt{n}}(1+2\sum_{i=1}^q r_i^2)^{\frac{1}{2}}\}$	0.8261	0.8261	0.8261	0.8696	0.9565	0.9565	0.9565

3.4.6 模型的进一步识别

采用 AIC 准则来进一步识别 MA(q)模型的阶数是否合适。通过计算,当 $q=12$ 时, $AIC(0,12) = \ln 0.5650 + \frac{2(0+12+1)}{540} = -0.5228$, AIC 达到最小值。这说明,初步确定的模型阶数为 12 阶是合适的。

3.4.7 模型检验

由式(6)经过整理后,得到残差序列表达式为

$$\epsilon_t = X'_t + 0.8219\epsilon_{t-12} \quad (7)$$

对 MA(q)模型,残差序列 ϵ_t 应采用递推法确定,即假定 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_{12}$ 为 0,然后利用式(7)递推求得 $\epsilon_{13}, \epsilon_{14}, \dots, \epsilon_n$ 。利用 Matlab 7.0 编程计算,求得残差序列 ϵ_t 的均值 $\bar{\epsilon}_t = -0.0125 \approx 0$,方差 $\sigma^2 = 0.5454$,并绘制残差序列变化曲线(图 6)。

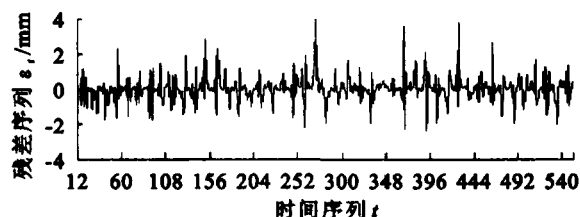


图6 残差序列变化

计算残差序列的自相关系数 $r_k(\epsilon)$,采用自相关系数综合检验法,检验残差项 ϵ_t 是否为独立序列。 $n=540$,取 $m=42$,经过计算,统计量 $Q = n \sum_{k=1}^m r_k^2(\epsilon) = 540 \times 0.08 = 43.2$,根据自由度 $(m-q=42-12=30)$ 查 χ^2 表得 $\chi_{0.05}^2 = 43.773$, $Q < \chi_{0.05}^2$,所以 ϵ_t 为独立随机序列。

3.4.8 模型预测

综合上述,基于小波消噪的 853 农场逐月降水季节性时

序模型为

$$(1-B^{12})P'_t = P'_t - P'_{t-12} = X_t = X'_t\sigma_X + \bar{X}_t = 43.1208(\epsilon_t - 0.8219\epsilon_{t-12}) - 0.3111 \quad (8)$$

对未来的降水量进行预报,实际上就是预测出未来的 $X'_t (t \geq 553)$ 。但由于对于未来的时间 t, ϵ_t 未知,所以也就无法预测 X'_t 。因此以 $k+l$ 代替式(6)中的 t ,并对该式两端取数学期望得

$$X'_k(l) = E(X'_{k+l}) = E(\epsilon_{k+l}) - 0.8219E(\epsilon_{k+l-12}) \quad (9)$$

预报步数 $l \geq 1$,以 2004 年 12 月为 k 时刻进行预报,则 $k=552$,因此式(9)转化为

$$X'_k(l) = -0.8219\epsilon_{540+l} \quad (10)$$

利用式(10)进行计算,得到 2005 年 1~12 月的逐月降水量的标准化预测值 $X'_{553}, X'_{554}, \dots, X'_{564}$ 。再将预测值 $X'_t (t=553 \sim 564)$ 代入式(8),即可得到 853 农场 2005 年 1~12 月消噪后的逐月降水量。然后采用未参加建模的 2005 年实测消噪数据进行后验预测检验,见表 2 和图 7。

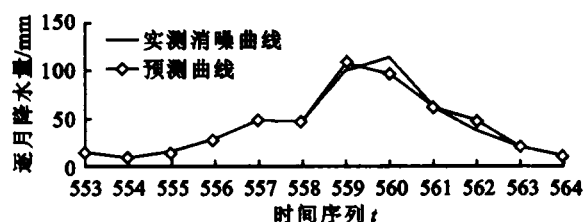


图7 2005 年逐月降水量季节性时序模型预测

按照前述方法,经过计算,确定性系数 $DC=0.97$,说明预测模型的有效性为甲等。文献[18]规定,降水预测的许可误差为实测值的 20%。经过计算,模型预报合格率为 91.67%,达到甲等标准,可用于实际降水预测。

表2 853 农场 2005 年逐月降水量后验预测误差

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
实测消噪值/mm	11.9608	9.6579	14.8966	25.9704	45.5116	38.1518	97.7291	71.8532	54.0502	37.9656	16.5427	9.7304
预测值/mm	13.9950	8.3227	15.5566	23.0901	50.4153	45.2545	110.8785	95.2616	50.5906	46.2023	20.0117	9.2638
相对误差/%	17.01	13.82	4.43	11.09	10.77	18.62	13.45	32.58	6.40	21.70	20.97	4.80

4 结 论

(1)通过分析三江平原低湿地井灌水稻区 853 农场 46 a 逐月降水的随机特性,建立了基于小波消噪的 853 农场逐月

降水季节性时序预测模型,经过评价,模型有效性、可靠性较高。该模型较为充分地揭示了 853 农场地区逐月降水的时间变化规律,对该地区充分利用天然降水、合理制定水稻灌溉制度以及农业和地下水资源的可持续发展具有重要意义。

(下转第 172 页)

化面积仍占全区国土总面积的1/4左右,说明晋北地区土地沙化形势仍十分严峻,生态环境仍十分脆弱,需要继续加大防沙治沙的力度。

(2)晋北地区土地沙化是一个自然与经济、社会相关联,是特定环境下自然因素和人为因素相互作用,以人为诱导因素为主所引起的土地退化过程。在这个过程中,干旱、大风创造了动力条件,丰富的沙物质提供了物质基础,而人口压力和不合理工农业活动则在土地沙化过程中起到了加速、推动作用。

(3)建议晋北地区按照“以防为主、保护优先、积极治理、合理利用、恢复植被、协调发展”的原则,通过控制人口增长和提高人口素质、调整产业结构和合理利用资源、加强植被保护和恢复重建、加大科技治沙和依法治沙力度、完善防沙治沙相关配套政策等途径,加快晋北地区土地沙化的预防与治理步伐,以改善晋北地区脆弱的生态环境,适应建设山川秀美新山西、建设社会主义新农村的需要。

参考文献:

- [1] 王涛. 我国沙漠化研究的若干问题:3 沙漠化研究和防治的重点区域[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 1-9.
 - [2] 秦作栋. 晋西北土地荒漠化及其整治对策研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 11-19.
 - [3] 马义娟, 苏志珠. 晋西北地区环境特征与土地荒漠化类型研究[J]. 水土保持研究, 2002, 9(3): 124-126.
 - [4] 史培军, 李博, 赵焯. 鄂尔多斯高原土地退化及其防治对策[M/OL]//史培军文集. <http://irs.bun.edu.cn/SPJBook>, 2001-06-18.
 - [5] 朱世忠. 沙化土地及其监测方法[J]. 山西林业科技, 2000(4): 45-47.
 - [6] 王庆锁, 李玉中. 我国的土地沙化及治理对策[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(6): 50-54.
 - [7] 史培军, 王静爱. 土地荒漠化[M]//史培军文集. <http://irs.bun.edu.cn/SPJBook>, 2001-06-18.
 - [8] 什么是土地沙化和土地沙漠化[EB/OL]. <http://www.htrwh.com>, 2005-08-10.
 - [9] 李双全. 山西省土地沙漠化的现状及防治对策[J]. 山西农业大学学报, 2000, 20(4): 342-345.
 - [10] 马义娟, 苏志珠. 山西省土地沙质荒漠化现状及其发展趋势研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 81-84.
-
- (上接第167页)
- (2)由表2可知,模型预报平均相对误差为7.23%,个别月份甚至超过了20%,说明降水等水文要素的中长期预报方法还不够完善,目前很难做到准确预报,这需要在将来的工作中进一步研究。
- 参考文献:**
- [1] 梁春英, 王熙, 杨天维. 精准农业在三江平原的应用研究与探讨[J]. 农机化研究, 2004(3): 193-194.
 - [2] 王韶华, 田园. 三江平原地下水埋深变化及成因的初步分析[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 61-64.
 - [3] 李士峰, 崔广臣, 杨国顺. 三江平原洪涝灾害及治理措施[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(1): 65-67.
 - [4] 李娟, 张维江, 马轶. 滑动平均-马尔可夫模型在降水预测中的应用[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 196-198, 205.
 - [5] Sahai A K, Soman M K, Satyan V. All India summer monsoon rainfall prediction using an artificial neural network[J]. Climate Dynamics, 2000, 16(4): 291-302.
 - [6] 钱家忠, 朱学愚, 吴剑锋. 地下水资源评价中降水量的时间序列-马尔可夫模型[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 65-67.
 - [7] 傅鹤林, 李亮, 刘宝琛. 降雨量预测理论模型及其工程应用研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(4): 62-66.
 - [8] 曹广学, 张世泉. BP模型在降雨径流预报中的应用研究[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(3): 350-353.
 - [9] Feng Y R, David H K. A short-range quantitative precipitation forecast algorithm using back-propagation neural network approach[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(3): 405-414.
 - [10] 王文胜, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 60-66.
 - [11] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
 - [12] 王仲民, 戴士杰, 岳宏, 等. 基于小波变换的信号消噪[J]. 河北工业大学学报, 2000, 29(5): 48-51.
 - [13] 付强. 农业水土资源系统分析与综合评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 228-235.
 - [14] 丁晶, 刘权授. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 54-59.
 - [15] 伍允桂, 李元, 王伟妍, 等. 应用时间序列分析[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 1999: 109-117.
 - [16] 任树梅, 朱仲元. 工程水文学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001: 249-251.
 - [17] 杨志霞. 时间序列模型在深层地下水水位预测中的应用[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 2000(3): 34-38.
 - [18] SL250-2000, 水文情报预报规范[S].