

洛惠渠灌区地下水动态敏感因子研究

于国强^{1,2}, 李占斌^{1,2}, 张霞³, 李鹏¹

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西省环境科学研究设计院, 陕西 西安 710061)

摘要: 以陕西省洛惠渠灌区实测数据为例, 首先采用多元时空序列马尔可夫链分析模型, 对多年来洛惠渠灌区地下水动态进行趋势因子评价分析; 采用改进的灰色斜率关联法分析各影响因子与地下水埋深的敏感关系; 提出临界蒸发量这一概念; 建立 ARIMA 动态模型, 并对蒸发量进行预测。结果表明, 该灌区地下水动态趋势较恶劣; 蒸发量是影响该灌区地下水动态的最敏感因子, 各因子之间相互作用, 形成了复杂条件下的耦合关系; 当蒸发量超过 1 800 mm 临界值时, 地下水位开始回升, 对土壤有盐碱化的威胁; 未来几年蒸发量多数超过临界值, 模型预测精度较高。将以上方法体系运用到灌区地下水动态研究中是切实可行的, 可统一管理和调控水资源提供科学依据。

关键词: 地下水动态; 马尔可夫链; 灰色斜率关联分析; 敏感性因子; 临界蒸发量; ARIMA 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)05-0137-05

中图分类号: S153.1, P332.7

Investigation on Sensitive Factors of Groundwater Dynamic in the Luohuiqu Irrigation District

YU Guo-qiang^{1,2}, LI Zhan-bin^{1,2}, ZHANG Xia³, LI Peng¹

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of the MOE, XAUT, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Research and Design Institute of Environmental Science of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract: Firstly, tendency factors of groundwater dynamic are evaluated and analyzed with measured data of the Luohuiqu irrigation district in Shaanxi Province based on the Markov chain model of multiple element time-space sequence. The improved grey slope coefficient correlation degree analysis method is applied to analyze the sensitive degree of various factors and groundwater depth. The concept of critical evaporation is put forward and the ARIMA model is established subsequently to predict evaporation. Results show that the tendency of groundwater dynamic in the irrigation district is worse. Evaporation is the main factor affecting groundwater dynamic and the interaction amongst various factors forms coupling relationship under the complicated condition. When evaporation exceeds the 1 800 mm critical value, groundwater level begins to rise and soil is subject to the threat of soil salinization. It is predicted that the evaporation in following several years almost exceeds the critical value and the precision of model is relatively high. It is feasible and practical to apply above method system to the investigation on groundwater dynamic in irrigation district. The study provides a scientific basis for unified management and regulation of water resources.

Keywords: groundwater dynamic; Markov chain; grey slope coefficient correlation degree analysis; sensitive factor; critical evaporation; ARIMA model

灌区在西北干旱半干旱地区的农业生产中占有重要地位。长期以来, 由于灌区水资源利用和管理中还存在不尽完善的方面, 灌区农业生态环境出现了土壤次生盐碱化、水质退化以及地下水位下降等不良生态环境问题。如何加强灌区水资源利用和管理, 减轻

或者避免灌区土地退化成为灌区面临的主要问题之一, 地下水动态研究是干旱内陆灌区水资源优化管理与调控的基础。本文利用多元时空序列马尔可夫链分析了该灌区地下水动态发展趋势, 采用改进的灰色斜率关联方法分析了各因子对地下水动态变化的影

收稿日期: 2008-07-08

修回日期: 2009-03-30

资助项目: 国家科技支撑项目(2006BAD09B02); 国家自然科学基金项目(40771124); 中日合作项目(SBS-379)

作者简介: 于国强(1979-), 男(汉族), 内蒙古自治区包头人, 博士研究生, 从事土壤侵蚀与水土保持等方面的研究。E-mail: yuguoqiang23@sina.com。

响程度, 根据其灰色斜率关联度进行了综合排序; 最终确定了敏感因子, 提出临界蒸发量这一概念; 在此基础上采用差分自回归移动平均 (ARIMA) 模型对蒸发量进行预测, 以完善系统模型。

1 研究方法

1.1 灌区概况

洛惠渠灌区位于陕西省关中平原东部的渭洛河阶地, 属大荔、蒲城、澄城 3 县管辖, 灌溉面积为 320 km², 海拔高度为 329~533.5 m。灌区因地层北升南降, 河流迁移, 曲化、淘深, 以及降水冲蚀, 形成了塬梁的沟壑和河谷阶地堆积地貌。灌区属温带大陆性半干旱气候区, 年平均气温为 13.5 °C, 年平均降雨量为 480 mm, 年平均蒸发量约 1 690 mm。灌区地下水补给来源主要是降雨和引水灌溉, 其次是塬区潜水和微承压水, 地面 40~50 m 以下的古湖沉积物中富集了大量的可溶盐类, 在水循环作用下, 古湖沉积物中富集的可溶盐上升, 致使潜水矿化度偏高, 有些地区水味咸苦, 不能引灌。因此, 对于干旱的内陆灌区来说, 农业生产会更多地依赖于地下水的开采。本研究将对洛惠渠灌区地下水动态敏感因子进行分析。

1.2 研究方法及内容

本研究主要采用观测井网来分析地下水动态特征, 水样取自液面下 3 m 处, 并测量其水位(水面到地面距离)、水温、电导率、pH 值。灌区地层北升南降, 根据所布设的各井点地理位置及海拔, 将整个灌区分分为 3 层阶地^[1-2]: 第一阶地: 342~360 m; 第二阶地: 360~369 m; 第三阶地: 370~388 m。针对灌区实际情况, 首先采用多元时空序列马尔可夫链分析方法对洛惠渠灌区地下水动态变化情况进行研究, 判别地下水动态变化趋势。

然后建立地下水动态灰色关联分析模型, 综合考虑各方面因素, 选取降雨量、蒸发量、灌溉面积、灌溉引水量、地下水消耗量和作物水分盈亏量作为子序列, 地下水埋深作为母序列, 综合体现了自然因素、人类活动因素以及生物因素对地下水动态的影响。样本数据来源于覆盖全灌区的 60 个观测井 1971—2005 年的观测资料; 所有相关样本均参与灰色关联分析, 从而找出影响地下水动态较为重要的敏感性因子。在此基础上对敏感性因子进行了进一步分析寻求与地下水埋深的关系; 同时采用差分自回归移动平均 (ARIMA) 模型对该敏感因子进行预测, 完善系统模型, 从而为改善灌区地表生态环境提供了更为精确的科学依据, 是对传统地下水动态研究方法的补充与完善。

2 多元时空序列马尔可夫链分析

多元时空序列马尔可夫链分析是在马尔可夫链分析的基础上以时间序列的内部结构为出发点, 应用多元时间序列分析和马尔可夫过程理论从实测时间序列中抽象出随机过程的概率规律。因此, 应用多元时空序列马尔可夫过程分析不仅可以揭示研究对象过程演变的宏观规律, 而且可以进一步作为阐明研究对象发生发展的微观机制的基础^[3-8]。

地下水动态是指地下水的数量和质量(包括地下水位、水量、水化学成分、水温等水文要素)随时间的变化过程^[9], 它反映了地下水的形成过程。影响地下水动态的因素很多, 如气候、水文、地质、生物及人为因素等, 从区域地下水动态的形成来说, 气候起主导作用, 其它因素在一定范围内的影响也很重要, 我国西北地区地形复杂、气候多变, 形成了多种地下水动态特征。

本文为综合体现灌区 35 a 间地下水动态变化过程, 以降雨量、蒸发量、灌溉面积、灌溉引水量、地下水消耗量、作物水分盈亏量和地下水埋深作为评价指标, 采用多因子马尔可夫模型进行分析。将所有观测指标按时间顺序排列, 组成序列相关矩阵, 矩阵中的元素为所有时间(空间)在滞后 1, 2, ..., n 步时的相互之间的相关系数, 即给定的多元序列, 从而计算转移概率矩阵; 并用 Householder 法通过相似变换将转移概率矩阵变换为上 Hessenberg 形, 用包含原点移动的两步 QR 方法求出矩阵的所有的特征值; 得出趋势因子 t_f , 该物理量反映了其变量最多数转移方向。趋势因子的变化规律反映了多变量演化过程的主要趋势(图 1), 考虑到灌区地下水动态各指标的实际情况, 此时趋势因子数值越大则代表地下水动态形势越为严峻。

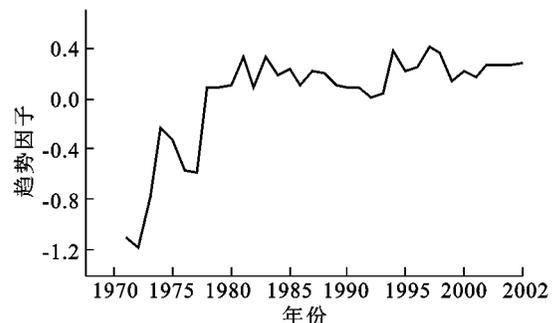


图 1 洛惠渠灌区地下水动态发展趋势因子

从图 1 可以看出, 70 年代地下水动态发展过程虽有小幅度波动, 但整体大幅度上升, 说明地下水动态趋势急剧恶劣, 这是因为在此期间由于农业生产结构比较单一, 灌溉制度不合理, 常年使用大水漫灌所致; 在以后的 20 a 间, 趋势因子态势比较平稳, 基本维持在 70 年代末水平上, 虽然这段时期气候条件相对较

差,但由于采用先进的耕作方式,健全完善排水系统以及加强灌溉管理,控制灌溉定额等措施,没有使地下水动态趋势进一步恶化,但趋势因子值依然很大,形势严峻,需要对其进行进一步治理。因此有必要对影响地下水动态的各个因子作进一步研究。

3 地下水动态的灰色斜率关联分析

3.1 改进的灰色斜率关联度

灰色系统理论中的关联分析是一种新的因素分析方法,它主要是通过对系统数据序列的几何关系进行比较来分析系统中各因素间的关联程度,因而关联分析可以真实反映一个系统中各种因素相互影响的关系。目前关于关联度的量化模型很多,如邓氏关联度、T 型关联度、广义关联度等,并取得了一定的应用效果。但这些关联度大都与邓氏关联度类似,不能反映正、负相关关系^[10-12]。本研究为了克服上述方法的不足,采用改进的灰色斜率关联度分析方法进行研究,其基本思想为:按照因素时间序列曲线的平均相对变化态势的接近程度来计算灰色关联度。

设 $X(t)$ 为系统特征函数, $Y_i(t) (i=1, 2, \dots, m)$ 为相关因素函数,称

$$\zeta_i(t) = \frac{1 + \left| \frac{1}{x} \cdot \frac{\Delta x(t)}{\Delta t} \right|}{1 + \left| \frac{1}{x} \cdot \frac{\Delta x(t)}{\Delta t} \right| + \left| \frac{1}{x} \cdot \frac{\Delta x(t)}{\Delta t} \right| - \frac{1}{y_i} \cdot \left| \frac{\Delta y_i(t)}{\Delta t} \right|} \quad (1)$$

为 $X(t)$ 与 $Y_i(t)$ 在 t 时刻的灰色斜率关联系数,其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x(t)$, $\Delta x(t) = x(t + \Delta t) - x(t)$; $\frac{\Delta x(t)}{\Delta t}$ 为系统特征函数 $X(t)$ 在 t 到 $t + \Delta t$ 的斜率; $y_i = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_i(t)$,

$\Delta y_i(t) = y_i(t + \Delta t) - y_i(t)$; $\frac{\Delta y_i(t)}{\Delta t}$ 为相关因素函数 $Y_i(t)$ 在 t 到 $t + \Delta t$ 的斜率。当 $X(t), Y_i(t) (i=1, 2, \dots, m)$ 皆为 1—时距的离散序列时, $X(t)$ 与 $Y_i(t)$ 在 t 到 $t + \Delta t$ 的灰色斜率关联系数公式可以简化为

$$\zeta_i(t) = \frac{1 + \left| \frac{\Delta x(t)}{x} \right|}{1 + \left| \frac{\Delta x(t)}{x} \right| + \left| \frac{\Delta x(t)}{x} \right| - \frac{\left| \frac{\Delta y_i(t)}{\Delta t} \right|}{\Delta t}} \quad (2)$$

则

$$\varepsilon = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} \zeta_i(t) \quad (3)$$

为 $X(t)$ 与 $Y_i(t)$ 灰色斜率关联度,灰色斜率关联系数反映了两曲线在某一点的变化率的一致程度,而灰色斜率关联度则是整个区间上灰色斜率关联系数的平均值, $X(t)$ 与 $Y_i(t)$ 的变化率越接近 ε 越大。

3.2 影响因子的灰色斜率关联度分析

这里采用该灌区的全部地下水动态输入样本作

为比较数列,输出样本作为参考数列进行灰色斜率关联度分析。利用式(2), (3) 计算得出,计算结果见表 1, 即: $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3 > \varepsilon_4 > \varepsilon_5 > \varepsilon_6$, 灌区蒸发量的斜率关联度最大,说明处于干旱内陆区的洛惠渠灌区地下水埋深受气候影响非常大,通常年蒸发量是降雨量的 3~7 倍不等,气候极其干燥,土壤中上升水流远比下降水流大,导致土体上部累积越来越多的盐分,从而在低洼处形成大面积的盐化土和盐土,一旦盐分聚集到地表后,渗透压将增大,蒸发速率降低,地表保持湿润的时间和土壤稳定蒸发的时间就延长,使得地下水或深层的水分不断向上运行,使盐土在不太强的大气蒸发力下具有比非盐土大的多的累积蒸发量;在有地下水补给的条件下,湿润锋上土壤水分及盐分的运移是同步进行的;在地下水位较高,且地下水含盐量较多时,随着地下水的上升蒸发,就可能引起土壤盐碱化^[13]。在干旱内陆大型灌区,作物需水量是相当巨大的,灌溉引水量远远不能够满足灌溉需求,这就需要大量抽取地下水来供给作物生长,由于当地主要实行渠井双灌制度,根据原始数据统计分析,井灌水量占有相当大的灌溉比例,平均年占有量为 41.9%,最大为 1992 年的 69.0%,这样导致地下水位迅速下降,因此作物水分盈亏量和地下水消耗量对地下水埋深的影响程度也较大,符合灌区实际情况;灌溉引水量和降雨量在满足作物需水量的同时,虽有入渗,但其量值在强烈地面蒸发的作用下与地下水埋深影响不大,降雨虽能淋洗掉土表的盐分,但小雨量往往会使盐土的返盐情况更加严重,因为小雨过后,土表湿润,与底土的水分发生毛细管连接,使土面蒸发增强,表土盐分进一步增加。

该区灌溉面积多年几乎不变,虽然对地下水埋深影响最小,但是影响也不能忽视,一旦增大或减少灌溉面积,势必会对地下水产生影响,此时就要考虑地下水动态变化情况对作物根层土壤的影响,以免影响作物的正常生长。

综上所述,该灌区的 6 个因子对地下水埋深变化都有不同程度的响应,蒸发量对地下水动态影响程度最大,地下水动态对其有很强的依赖性,生物因素影响其次;人类活动是在自然、生物作用结果之上加以调节,从而影响地下水埋深。

4 蒸发量对地下水动态影响特性分析

通过以上分析得出,蒸发量是影响该灌区地下水动态最敏感的因子,蒸发量的大小直接关系到地下水动态的发展趋势,从而使土壤有盐碱化威胁,危害农作物的生长;在此提出临界蒸发量这一概念。

表 1 地下水埋深与其它因子的关联度

因子	蒸发量	作物水分盈亏	地下水消耗量	灌溉引水量	降雨量	灌溉面积
关联度 ε	0.966 7	0.916 6	0.832 2	0.754 4	0.708 6	0.661 7

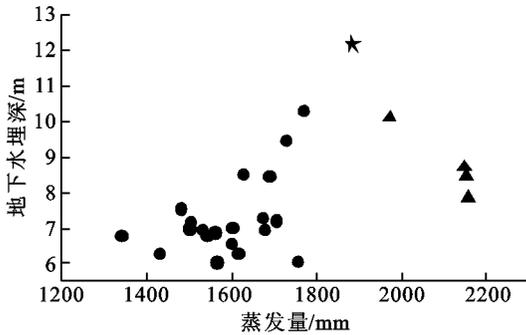


图 2 蒸发量与地下水埋深的关系

由图 2 可以看出,随着蒸发量的增加,地下水埋深逐渐加大,即水位下降;当蒸发量增大到 1 880 mm 时,地下水埋深开始减小,水位逐渐回升;水位下降是由于强烈的蒸发使地下水通过土壤孔隙毛管作用带到土壤表层补充蒸发掉的水分,蒸发量越大,就有越多的水分被转移到土壤表层,这样水位下降就越快,当水位下降到某一区域时,土壤毛管作用已无力将水分带到土壤表层,这样地下水就失去了与上层土壤的联系,不再补充土壤蒸发失去的水分,使地下水埋深得到缓解。由此可以判定该灌区的临界蒸发量为 1 800 mm 左右。当蒸发量继续增大,水位开始回升,这是由于强烈的蒸发集中在夏季,主要为 7、8 月份,而此时正是农作物生长旺盛期,为满足作物足够的需求量,该灌区主要以引北洛河水为主加以灌溉,同时大量补充地下水,使地下水埋深逐渐减小,水位迅速回升。

由于该灌区的古湖沉积物中富集了大量的可溶盐类,当蒸发量大于临界值,地下水位处于最低值时,在水循环作用下,虽然地下水埋深得到缓解,但可溶盐会随水循环上升,最终导致潜水矿化度偏高。这样回升以后的地下水水质就会变得恶劣,使土壤有盐碱化的威胁,危害农作物的生长。蒸发量属自然因素,是不能人为控制的,但可以根据临界蒸发量来初步判定地下水埋深情况,从而通过控制引水量来调节地下水位,进而控制深层地下水可溶盐分的上升,以确保灌区良好的灌溉水质;鉴于不同植物根系在土壤中所处位置不同而导致临界水位难以确定,临界蒸发量这一概念的提出会为灌区灾害预测以及灌区统一管理和调控提供科学依据。

5 差分自回归移动平均 (ARIMA) 模型

蒸发量是影响该灌区地下水动态最为敏感的因素,

蒸发量如果超过 1 800 mm 临界值时,会使灌区土壤造成较大的盐碱化威胁,对灌区农作物生长产生危害。因此有必要建立蒸发量预测模型以提供灾年预报信息,有助于灌区农业生产、耕作以及地下水的调控管理。

ARIMA 模型在作时间序列分析时,根据历史数据的变动规律,找出数据变动模型(移动平均数、周期成分),从而实现对未来数据的预测。Box—Jenkins 的建模方法较为复杂,在数学上较为完善,预测的精度较高,而且灵活有度。其基本思想是:将预测对象随时间推移而形成的数据序列视为一个随机序列,用一定的数学模型来近似描述这个序列。这个模型一旦被识别后就可以从时间序列的过去值及现在值来预测未来值^[14-16]。

本文利用洛惠渠灌区近 25 a 间蒸发量资料,首先根据时间序列散点图、自相关函数和偏自相关函数图以 ADF 单位根检验其方差、趋势及其季节性变化规律,对序列的平稳性进行识别;然后对非平稳序列进行平稳化处理,处理后数据的自相关函数值和偏相关函数值无显著异于零;根据时间序列模型阶次辨识建立相应的模型,通过参数估计和假设检验来判别所建立的模型是否合理;最后利用已通过检验的模型进行预测分析。本文通过 SAS^[17] 软件建立 ARIMA (1, 1, 1) 动态模型,经检验该模型残差序列为白噪声,最小信息量 AIC = 9.815, 拟合度 $C = 89.98\%$, $r_2 = 0.92$, 符合标准。应用该模型对蒸发量作了模拟预测,实验结果与实况较近(如图 3 所示)。

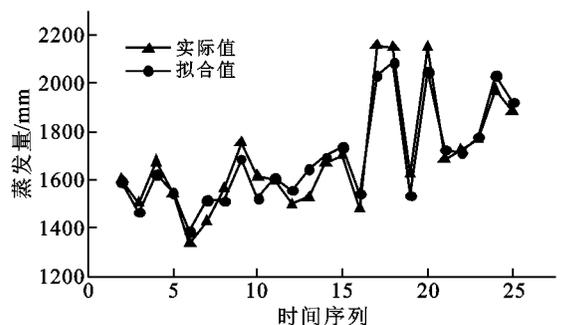


图 3 洛惠渠灌区蒸发量实际值与拟合值

应用该模型对未来 5 a 的蒸发量进行预测,预测结果显示 2006—2010 年的蒸发量分别为 1 955, 1 698, 2 047, 2 219, 2 149 mm, 2006—2008 年蒸发量实际值分别为 2 024, 1 768, 2 217 mm, 模型预测程度

较高。这说明在未来 5 a 内,该灌区地表蒸发强烈,要求采取必要措施如防止地下水污染,合理采用地下水回灌措施,改善水资源管理体制,健全完善排水系统等^[8],来调节灌溉用水量,控制地下水埋深与排引比,避免土壤盐碱化的发生,为改善灌区地表生态环境提供了科学依据。

6 结论

本文首先以降雨量、蒸发量、灌溉面积、灌溉引水量、地下水消耗量、作物水分盈亏量和地下水埋深等可以综合体现地下水动态的因子作为评价指标,采用多元时空序列马尔可夫链分析模型,对多年来洛惠渠灌区地下水动态进行趋势因子评价分析;其次采用改进的灰色斜率关联法分析各因子与地下水埋深的关系,寻求出影响地下水动态的敏感因子;在此基础上详细分析了蒸发量这一敏感因子与地下水埋深的关系;随后建立 ARIMA 动态模型,并对蒸发量进行预测。

(1) 近些年该灌区地下水动态趋势虽比较平缓,但趋势因子值较大,形势依然比较恶劣,需要对其进行进一步治理。

(2) 影响地下水埋深的各因子之间彼此相互作用,相互影响,形成了复杂条件下的耦合关系。各变量因子对地下水埋深的敏感程度为:蒸发量>作物水分盈亏量>地下水消耗量>灌溉引水量>降雨量>灌溉面积,说明该灌区蒸发量敏感性最大,地下水动态对其有很强的依赖性,而人类活动是在自然、生物作用结果之上加以调节。

(3) 提出了临界蒸发量这一概念,当蒸发量超过 1 800 mm 临界值时,地下水水位在水循环的作用下开始回升,这样便携带了大量的盐分,使地下水水质变得恶劣,土壤有盐碱化的威胁。

(4) 所建立的 ARIMA 动态模型预测精度较高,预测出未来几年的蒸发量多数已超过临界值。由此可以确定,适当的灌溉模式,完善的排水系统,有效控制地下水埋深是灌区未来应采取的重要措施。

将以上方法体系运用到灌区地下水动态研究中是切实可行的,是对传统地下水动态研究方法的补充与完善,为改善灌区地表生态环境以及统一管理和调控水资源提供科学依据。

[参 考 文 献]

- [1] 张霞,李占斌,李鹏.洛惠渠灌区地下水动态变化规律研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(8):223-226.
- [2] 于国强,李占斌,张霞,等.洛惠渠灌区水土化学特性分析[J].水土保持通报,2009,29(1):103-107.
- [3] 孙丹峰,李红,张凤荣.基于动态统计规则和景观格局特征的土地利用覆被空间模拟预测[J].农业工程学报,2005,21(3):124-124.
- [4] 夏乐天.马尔可夫链预测方法的统计试验研究[J].水利学报,2007:372-377.
- [5] 游珍,杜传亮,李永涛.基于灰色-马尔可夫耦合模型的区域建设用地需求预测[J].生态环境,2007,16(5):1528-1532.
- [6] 苗作华,刘耀林,王海军.耕地需求量预测的加权模糊-马尔可夫链模型[J].武汉大学学报,2005,30(4):26-29.
- [7] Luijten J C. A systematic method for generating land use patterns using stochastic rules and basic landscape characteristics: results for a Colombian hillside watershed [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2003, 95: 427-441.
- [8] Weber A, Fohrer N, Moller D. Long-term land use changes in a mesoscale watershed due to socio-economic factors: effects on landscape and functions [J]. *Ecol Model*, 2001, 140(1/2):125-140.
- [9] Lallahem S, Maniaa J, Hani A. On the use of neural networks to evaluate groundwater levels in fractured media [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 307: 92-111.
- [10] 邓聚龙.灰色系统的基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987:95-106.
- [11] 王正新,党耀国,刘思峰.两阶段灰色模型及其应用[J].系统工程理论与实践,2008,28(11):109-114.
- [12] 朱湖根,梁国才.有时序与非时序系统的灰色关联度分析[J].信息与控制,1992,21(3):177-179.
- [13] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:289-297.
- [14] 杨绍辉,王一鸣,郭正琴,等.ARIMA 模型预测土壤墒情研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):114-117.
- [15] SWAMY P A. Correcting for omitted variable and measurement-error bias in autoregressive model estimation with panel data [J]. *Computational Economics*, 2003, 22: 225-253.
- [16] G P E Box, G M Jenkins. *Time Series Analysis: Forecasting and Control* [M]. San Francisco: San Francisco Press, 1978: 689-717.
- [17] SAS/EST 软件的使用手册[M].北京:中国统计出版社,1998:65-106.