

洛惠渠灌区地下水位动态模拟研究

于国强¹,李占斌^{1,2},张霞³,李鹏¹,杜中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】 【目的】探求洛惠渠灌区地下水的动态变化情况,为该灌区地表生态环境的改善提供科学依据。【方法】以陕西洛惠渠灌区实测数据为例,采用 3 层 BP 网络建模方法,对灌区自然-人工-生物条件下地下水位动态进行研究,运用缺省因子检验法分析各因子对地下水埋深影响的敏感性;并采用灰色关联方法分析各因子与地下水埋深的关系。【结果】人工神经网络模型具有较高的精度,能够定量描述地下水位动态与各因子之间的响应关系,蒸发量是影响该灌区地下水位动态的主要因子,各因子之间相互作用,形成了复杂条件下的耦合关系;灰色关联排序结果基本符合敏感性因子分析结果,很好地验证了各因子的敏感程度。【结论】将这 2 种方法结合运用到灌区地下水位动态评价中是切实可行的,是对传统地下水位动态研究方法的补充与完善。

【关键词】 洛惠渠灌区;地下水位动态;人工神经网络;敏感性因子;灰色关联分析

【中图分类号】 S152.7

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)12-0223-06

Simulation study on groundwater level dynamic in Luohuiqu irrigation district

YU Guo-qiang¹,LI Zhan-bin^{1,2},ZHANG Xia³,LI Peng¹,DU Zhong¹

(1 Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of Moe at 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,China;

3 Research and Design Institute of Environmental Science of Shaanxi Province,Xi'an,Shaanxi 710061,China)

Abstract: 【Objective】 It can provide scientific basis for the improvement of the ecological environment to explore the dynamic variation of groundwater in Luohuiqu irrigation district. 【Method】 Groundwater level dynamic under natural-artificial-biological conditions was studied with measured data as example based on application of BP network of three layers. The additional momentum method and self adaptive tactic for training were adopted; sensitivity analysis about groundwater depth was conducted according to each factor by using default factor method; and the grey correlation analysis method was applied to analyze the relations between factors and groundwater depth. 【Result】 The results show that the artificial neural network model can express quantitatively the response relationship between groundwater level dynamic and various factors with sufficient high accuracy. The evaporation is the main factor affecting groundwater level dynamic in this irrigation district, and the interrelationship amongst various factors form coupling relationship under the complicated condition. The ranking results correspond to the analysis results about sensitive factors basically, and the grey correlation analysis method can also verify the sensitivity degree amongst various factors. 【Conclusion】 It is feasible and practical to combine the two methods in the appraisal of

* [收稿日期] 2009-04-02

[基金项目] 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“沙漠化防治规划研究”(SBS-379);西安理工大学优秀博士学位论文基金项目(106-210911)

[作者简介] 于国强(1979—),男,内蒙古包头人,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: yuguoqiang23@sina.com

groundwater level dynamic in irrigation district, which supplements and perfects the traditional research methods of groundwater level dynamic.

Key words: Luohuiqu irrigation district; groundwater level dynamic; artificial neural network; sensitive factor; grey correlation analysis

我国西北内陆灌区由于水资源开发利用和管理中还存在不尽完善的方面,出现了一些不良生态环境问题,如土壤次生盐渍化、天然植被衰败、土地沙漠化、地下水水质恶化、地下水位持续下降、地面沉降等生态环境问题,水资源贫乏和生态环境先天性脆弱已成为制约当地经济发展的主要因素之一。地下水位动态模拟是干旱内陆灌区水资源优化管理与调控的基础。对大型灌区而言,传统的地下水位动态研究主要是基于水文地质条件进行参数率定、模型及数值模拟等^[1],但由于地下水流类型、边界条件等难以准确确定,水文地质参数的优选过程也因影响因素繁杂等而很难实现^[2-4]。若以灌域为基本单位,其自然-人工-生物条件下的地下水系统时空变异特性极为显著,影响因素多种多样,因果关系存在很强的非线性。因此,在地下水调控决策前有必要了解各个影响因子与地下水系统动态之间的定量关系,建立自然条件与人类活动条件下地下水位动态的量化模型,这对于干旱内陆灌区地下水资源的管理与调控具有重要的实际意义。

近年来,人工神经网络(Artificial Neural Network)在陆地水文,尤其是地下水系统研究中得到了广泛的应用^[3-9],但现有的研究大多是针对田间小块区域或某段时间序列的相对简单条件下进行的,虽有些研究^[9]同时考虑了自然因素、人类活动等条件,但是对各敏感因子的讨论以及敏感程度等还少有涉及。为此,本研究利用改进的 BP 网络技术建立了大型灌区的地下水位动态模型,分析了自然-人工-生物复合因素对灌区地下水位动态的影响,运用缺省因子检验法分析了各因子对灌区地下水位动态影响的敏感性,同时还采用灰色关联方法定量分析了上述各因子对地下水位动态变化的敏感程度,并根据其关联度进行了综合排序,以对 BP 神经网络进行检验,从而完善模型系统,以期改善灌区地表生态环境提供更精确的科学依据。

1 BP 网络及其改进的 BP 学习算法

神经网络可以广泛应用于函数逼近、模式识别、分类和数据压缩。由非线性变换单元组成的 BP 网络不仅结构简单,而且具有很好的非线性映射能

力^[4-10],但这种调节权值的方法存在收敛速度慢和容易陷入局部极小点等缺点。地下水文模拟及预测实际上是函数映射或拟合问题,3 层 BP 网络能够满足需要^[4-5]。本研究采用应用最广的增加冲量(动量)项的改进 BP 算法,采用附加动量法和自适应学习速率 2 种策略,避免陷入局部极小值并加快了网络的训练速度。该方法是在反向传播的基础上,在每一个权值的变化上加上一项正比于前次权值变化量的值,并根据反向传播法来产生新的权值变化。带有附加动量因子的权值调节公式为:

$$\Delta V_{jt}(k+1)=(1-mc)\eta d_{jt}b_j+mc\Delta V_{jt}(k),$$
$$j=1,2,\cdots,l;t=1,2,\cdots,n;$$

$$\Delta V_{1t}(k+1)=(1-mc)\eta d_t+mc\Delta V_{1t}(k),$$
$$t=1,2,\cdots,n。$$

式中: Δ 为增量, V_{jt} 为输入层到隐含层(隐含层到输出层)的连接权值, k 为训练次数, mc 为动量因子, η 为学习速率, d_t 为输出层(隐含层)第 t 神经元的一般化误差曲面斜率, b_j 为第 j 神经元输出, V_{1t} 为隐含层、输出层神经元的阈值。

根据附加动量因子的设计原则,当修正的权值在误差中导致太大的增长结果时,新的权值应被取消而不被采用,并使动量作用停下来,以使网络不进入较大误差曲面;当新的误差变化率对其旧值超过一个事先设定的最大误差变化率时,也应取消所计算的权值变化。典型的值取 $1.04^{[4]}$ 。训练程序中采用动量法的判断条件为:

$$mc=\begin{cases} 0, SSE(k)>SSE(k-1)\cdot 1.04; \\ 0.95, SSE(k)<SSE(k-1); \\ mc, \text{其他。} \end{cases}$$

式中: SSE 为误差平方和。对于一个特定的问题,选择适当的学习速率比较困难,通常要凭经验或试验获得。即使这样,对训练初期功效较好的学习速率,也不一定对以后的训练合适。为了解决这个问题,可以在训练过程中自动调整学习速率。自适应学习速率的调整公式为:

$$\eta(k+1)=\begin{cases} 1.05\eta(k), SSE(k+1)<SSE(k); \\ 0.7\eta(k), SSE(k+1)>1.04\cdot SSE(k); \\ \eta(k), \text{其他。} \end{cases}$$

2 地下水位动态人工神经网络模型的建立

2.1 研究区概况

洛惠渠灌区位于陕西关中平原东部的渭洛河阶地,属渭南大荔县,地理坐标为北纬 $34^{\circ}36' \sim 35^{\circ}02'$,东经 $109^{\circ}43' \sim 110^{\circ}19'$ 。东接黄河滩,西至卤泊滩钟家寨,北临韦庄、蒲城二塬,南隔洛河。该灌区灌溉历史悠久,自开灌以来,由于排水系统不健全,使灌区地下水位迅速上升。随着工程设施和管理水平的提高,减少了地下水的补给量,地下水位又不断下降,盐碱地面积由 0.43 万 hm^2 减小到 0.31 万 hm^2 。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^[11-12]。

2.2 输入、输出因子的选取及训练样本预处理

针对灌区实际情况,建立了地下水位动态 BP 网络模型,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 6 个因子作为输入因子,以地下水埋深作为输出变量,综合体现自然因素、人类活动因素以及生物因素对地下水位动态的影响。样本数据来源于覆盖全灌区的 78 个观测井 1971~2002 年的观测资料,准确度较高,所有相关样本均参与网络的训练、检验。

神经网络学习前的数据预处理对网络有至关重要的影响。前述各影响因子在数值上的变化相差较大,量纲也不相同,若使用实际数据会影响网络学习的速度和精度,不能直接用于训练,故将输入、输出数据进行规范化处理,并留下一定的预报空间,因此在训练时采用标准的归一法将实际数据处理到 $[0, 1]$ 区间。

2.3 模型的训练及检验

本研究涉及 1971-01~2002-12 共 384 组地下水位动态输入、输出样本。由于研究区地下水位呈逐年下降趋势^[11-12],为使所建模型有一定的泛化能力,选取 1971-01~1990-12 的 240 组样本作为月地下水位动态的训练样本。研究表明,3 层 BP 网络可以逼近任何有理函数^[5]。本研究选取 3 层 BP 网络,各层传递函数为 S 型函数 $f(x) = 1/(1 + e^{-x})$,以其作为 BP 神经网络的传递函数,应用 MATLAB 神经网络工具箱编写程序,建立地下水位动态模型,对输

入、输出样本进行训练。经过反复调整隐含层结点数,最终确定网络拓扑结构为 $6:8:1$,学习速率 η 为 0.10,动量因子 mc 为 0.7,模型在训练过程中表现出较好的误差收敛性能。采用未参与训练的 144 组输入、输出样本对建立的模型进行检验,结果见图 1。图 1 结果表明,该网络模型具有较高的精度,洛惠渠灌区地下水埋深平均检验误差为 0.027 6 m,能有效表征自然-人工-生物条件下地下水位动态的变化情况。

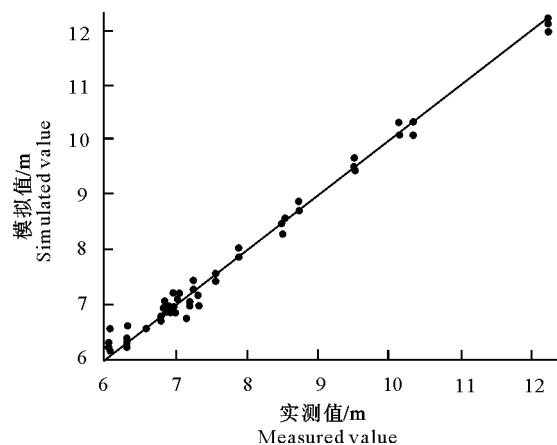


图 1 地下水埋深神经网络模型模拟值与实测值的比较
Fig. 1 Comparison of simulated values with measured values of the groundwater depth neural network model

3 地下水位动态模型的敏感性分析

3.1 缺省因子检验法

在地下水位动态模型建立中,考虑了包括自然-人工-生物条件等对地下水位动态可能的影响因素,但在实际地下水位动态调控中,许多因素往往很难同时考虑,这就需要确定影响地下水位动态较为强烈的因素。本研究对地下水位动态影响因素进行人工神经网络模型的缺省因子检验,即通过对各输入因子的缺省进行网络模型的建立、检验,根据其检验误差与全因子模型检验误差的比值 R_i 大小来确定输出因子对缺省因子的响应程度。

$$R_i = RMSE_i / RMSE. \quad (5)$$

式中: R_i 为敏感性指数, $RMSE_i$ 为缺省第 i 个因子时模型的检验误差, $RMSE$ 为全因子模型的检验误差。若 $RMSE_i$ 大于 $RMSE_j$,则表明地下水位动态对第 i 个因子较第 j 个因子敏感。

3.2 敏感性因子分析

将已建立地下水位动态模型的 6 个输入因子逐一进行缺省检验,建立了 5 因子地下水位动态模型。

为使 5 因子模型与 6 因子模型具有可比性,在建模过程中所采用的训练样本、检验样本等均同于 6 因子模型,同样采用改进的 BP 网络学习算法。

通过缺省因子检验法对不同 6 因子的模型分析(表 1)表明:5 因子模型的检验误差与 6 因子模型相比均有不同程度的增大($R>1$),说明模型输入因子对地下水位动态均有不同程度的影响。洛惠渠灌区地下水位动态对 6 个因子的敏感程度依次表现为,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。由此可知,灌区蒸发量的检验误差最大,其 R 值为 7.65,说明处于干旱内陆区的洛惠渠灌区,其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,气候极其干燥,土壤中上升水流远较下降水流大,导致土体上部盐分累积越来越多,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较非盐土大得多的累积蒸发量^[13];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;

表 1 地下水位动态人工神经网络模型缺省因子的检验

输出因子 Output factor	全因子 Whole factor	蒸发量/mm Evaporation	降雨量/mm Rain fall	灌溉面积/hm ² Irrigated area	灌溉引水量/hm ³ Water diversion	地下水消耗量/hm ³ Groundwater consumption	作物水分盈亏量/hm ³ Crop water budget
最大误差 Maximal error	0.147	2.080	0.242	0.159	0.527	0.605	0.369
平均误差 Average error	0.027 6	0.254	0.052	0.040	0.092	0.095	0.119
R	—	7.65	1.89	1.37	2.44	2.46	2.50
敏感因子排序 Sensitive factor sequence	—	1	5	6	4	3	2

综上对各敏感性因子的分析可知,洛惠渠灌区的 6 个因子对地下水埋深变化均有不同程度的响应,自然-生物因素对地下水位动态影响的敏感性最大,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,致使地下水位持续下降。

4 地下水位动态的灰色关联分析

4.1 灰色关联分析的原理

灰色关联分析方法的基本思路是,根据各比较数列集构成的曲线族与参考数列构成的曲线之间的

$$\xi_i(k)=r(x_0(k),x_i(k))=\frac{\min_{i\in m}\min_{k\in n}|x_0(k)-x_i(k)|+\rho\max_{i\in m}\max_{k\in n}|x_0(k)-x_i(k)|}{|x_0(k)-x_i(k)|+\rho\max_{i\in m}\max_{k\in n}|x_0(k)-x_i(k)|}.$$

(6)

式中: $\xi_i(k)$ 是第 k 时刻比较曲线 x_i 对参考曲线 x_0 的相对差值,这种形式的相对差值称为 x_i 对 x_0 在 k

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,就可能引起土壤盐渍化,导致强烈蒸发,成为当地地下水位下降的主要因素。在干旱内陆大型灌区,作物需水量相当巨大,灌溉引水量远远不能满足灌溉的需求,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,地下水埋深对作物水分盈亏量和地下水消耗量的敏感性也较大,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,虽有部分入渗,但其量值在强烈的地面蒸发作用下对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。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位动态变化对作物根层土壤的影响,以免影响作物的正常生长。

几何相似程度,来确定比较数列集与参考数列构成曲线的几何相似程度,其形状越相似,相关联程度越大^[14-16]。

设参考数列为 $Y_0(k)$,比较数列为 $Y_i(k),i=1,2,3,\cdots,m$,序列长度为 N ,研究确定 $Y_i(k)$ 与 $Y_0(k)$ 的密切程度,即求 $Y_i(k)$ 与 $Y_0(k)$ 序列的相关度。为了保证得到正确的分析结果,首先应对原始数据进行无量纲化。本研究采用标准化变换,得到新数据序列 $x_0(k)$ 与 $x_i(k)$ 即为标准化序列。点关联系数的定义为:

时刻的关联系数; ρ 为分辨系数,取值一般为 0~1,文中取 $\rho=0.5$ 。

有了关联系数计算公式,根据灰关联空间所述,关联度的计算公式如下:

$$r_{0i} = r(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r[x_0(k), x_i(k)]. \quad (7)$$

若将 $r[x_0(k), x_i(k)]$ 用 $\xi_i(k)$ 代替, r_{0i} 用 r_i 代替,则:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k). \quad (8)$$

4.2 敏感因子的灰色关联分析

本研究采用神经网络学习算法中的全部 384 组地下水位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关联分析。利用式(6)、(8)计算得出,蒸发量对地下水埋深的关联度 $r_1 = 0.9471$,作物水分盈亏量对地下水埋深的关联度 $r_2 = 0.9088$,地下水消耗量对地下水埋深的关联度 $r_3 = 0.8495$,灌溉引水量对地下水埋深的关联度 $r_4 = 0.7660$,降雨量对地下水埋深的关联度 $r_5 = 0.7125$,灌溉面积对地下水埋深的关联度 $r_6 = 0.6701$;其关联序为 $r_1 > r_2 > r_3 > r_4 > r_5 > r_6$,排序结果与敏感性因子分析结果基本一致。由此说明,该 BP 人工神经网络模型具有较高的精度,可以很好地定量描述地下水动态与各因子之间的响应关系,并且进一步验证了缺省因子检验法计算因子敏感程度的正确性,也是对灰色关联分析的自我检验。

5 结 论

本文用改进的 BP 神经网络法对于旱内陆大型灌区——洛惠渠灌区,复合条件下地下水位的动态进行了研究。结果表明,所建立的网络模型具有较高的精度,利用该模型对洛惠渠灌区地下水埋深平均检验误差为 0.0276 m,能有效表征复合条件下地下水位动态的变化情况。同时,运用缺省因子检验法详细分析了输入层各变量因子对地下水埋深的敏感性,其敏感程度表现为: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,说明该灌区地下水位动态对自然-生物因子的敏感性最大,并具有很强的依赖性,而人类活动因子的影响作用则是在自然-生物因子的作用结果之上表现出一定的调节作用,致使地下水位持续下降。其次,采用灰色关联方法对上述各敏感性因子与地下水埋深的关系进行了量化,根据关联度进行了综合排序,结果表明,灰色关联法排序结果与敏感性因子分析结果吻合,说明 BP 人工神经网络模型可以很好地描述地下水位动态与各影响因子之间的关系,

并且进一步验证了缺省因子检验法计算因子敏感程度的正确性,同时也实现了灰色关联分析的自我检验。本研究结果提示:各因子之间也彼此相互作用,形成了复杂条件下的耦合关系,将这 2 种方法相结合运用到大型灌区的地下水位动态评价中是切实可行的,为灌区地表生态环境的改善提供了更精确的科学依据。

[参考文献]

- [1] 张祥伟,竹内邦良. 大区域地下水模拟的理论与方法 [J]. 水利学报, 2004, 35(6): 7-13.
Zhang X W, Takeuchi Kuniyoshi. Methodology for modeling of groundwater flow in large area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(6): 7-13. (in Chinese)
- [2] 韩宇平, 许拯民, 蒋任飞. 银川平原地下水流的数值模拟 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(12): 222-226.
Han Y P, Xu Z M, Jiang R F. Groundwater flowing model and its numerical simulation in Yinchuan plain [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2007, 35(12): 222-226. (in Chinese)
- [3] 朱星明, 卢长娜, 王如云, 等. 基于人工神经网络的洪水水位预报模型 [J]. 水利学报, 2005, 36(7): 806-811.
Zhu X M, Lu C N, Wang R Y, et al. Artificial neural network model for flood water level forecasting [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 806-811. (in Chinese)
- [4] 乔冬梅, 史海滨, 霍再林. 浅地下水埋深条件下土壤水盐动态 BP 网络模型研究 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 42-46.
Qiao D M, Shi H B, Huo Z L. BP network model for soil water-salt movement with a shallow groundwater table [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 42-46. (in Chinese)
- [5] 刘国东, 丁 晶. BP 网络用于水文预测的几个问题探讨 [J]. 水利学报, 1999, 30(1): 65-70.
Liu G D, Ding J. Discussion on problems of BP neural networks applied to hydrological prediction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(1): 65-70. (in Chinese)
- [6] 付永峰, 张 建, 罗光明, 等. 基于改进 BP 神经网络的地下水水质评价——以新疆和田地区为例 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(11): 129-132.
Fu Y F, Zhang J, Luo G M, et al. Application of BP network to groundwater quality evaluation——Case study of Hotan sub-project area Xinjiang [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2004, 32(11): 129-132. (in Chinese)
- [7] Joannis N D, Pauline C, Joannis K T. Groundwater level forecasting using artificial neural networks [J]. Journal of Hydrology, 2005, 309: 229-240.
- [8] Emery C J, Mary P, Emmanuel C. Application of artificial neural networks to complex groundwater management problems [J]. Natural Resources Research, 2003, 12(4): 303-320.
- [9] Emery A C J, Anthony J R, Mary M P. Aneural network model for predicting aquifer water level elevations [J]. Ground Water, 2005, 43(2): 231-241.

[10] 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.

[11] 张 霞,李占斌,李 鹏. 洛惠渠灌区地下水位动态变化规律研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(8):223-226.
Zhang X, Li Z B, Li P. Investigation on dynamical rules of groundwater in Luohui trench irrigation district [J]. Journal of Northwest A&F University; Nat Sci Ed,2007,35(8):223-226. (in Chinese)

[12] 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.
Yu G Q, Li Z B, Zhang X, et al. Analysis on water and soil chemical characteristic of Luohui trench irrigation district [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29 (1): 103-107. (in Chinese)

[13] 黄梦琪,蔡焕杰,黄志辉. 黄土地区不同埋深条件下潜水蒸发 的研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35 (3):233-237.

[14] Huang M Q,Cai H J, Huang Z H. Research on the evapora- tion of underground water in different burying depth condi- tions on the Loess area [J]. Journal of Northwest A&F Uni- versity; Nat Sci Ed,2007,35(3):233-237. (in Chinese)

[15] Fu C, Zheng J, Zhao J, et al. Application of grey relational a- nalysis for corrosion failure of oil tubes [J]. Corrosion Sci- ence,2001,43(5):881-889.

[15] 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.
Wang Z X,Dang Y G,Liu S F. Two stage grey model and its application [J]. Systems Engineering-Theory Practice,2008, 28(11):109-114. (in Chinese)

[16] 沈 冰,刘 敏,黄领梅. 灰色自记忆模型及其在新疆和田地 下水埋深预测中的应用 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科 学版,2006,34(11):223-226.
Shen B,Liu M,Huang L M. Grey self-memory model and its application in the prediction of groundwater depth in Hotan, Xinjiang [J]. Journal of Northwest A&F University; Nat Sci Ed,2006,34(11):223-226. (in Chinese)

(上接第 222 页)

[14] 西北勘测设计研究院. SL/T 191—96 水工混凝土结构设计规 范 [S]. 北京:中国水利水电出版社,1998.
Hydro China Xibei Engineering Corporation. SL/T 191—96 Design code for hydraulic concrete structure [S]. Beijing; Chi- na Water Power Press,1998. (in Chinese)

[15] 中国水利水电科学研究院. SL 203—97 水工建筑物抗震设计 规范 [S]. 北京:中国水利水电出版社,1998.
China Institute of Water Resources and Hydropower Re- search. SL 203—97 Specifications for sesimus design of hy- draulic structure [S]. Beijing; China Water Power Press, 1998. (in Chinese)

[16] 竺慧珠,陈德亮,管枫年. 渡槽 [M]. 北京:中国水利水电出版 社,2005.
Zhu H Z,Chen D L,Guan F N. Aqueduct [M]. Beijing;China Water Power Press,2005. (in Chinese)

[17] 刘 瑞. 水工钢筋混凝土结构学 [M]. 3 版. 北京:中国水利水 电出版社,2008.
Liu R. Hydraulic reinforced concrete design [M]. 3th ed. Bei- jing;China Water Power Press,2008. (in Chinese)

[18] 周 氏. 水工钢筋混凝土结构学 [M]. 2 版. 北京:水利电力出 版社,1987.
Zhou D. Hydraulic reinforced concrete design [M]. 2th ed. Beijing;China WaterPower Press,1987. (in Chinese)