

# 基于 GIS 和人工神经网络的区域水资源 压力评价模型及其验证

吴璞周, 卫海燕

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

**摘要:** 水资源是一种战略性资源, 对于区域的生态环境安全和可持续发展具有重要意义。运用 GIS 二次开发技术, 建立了区域水资源管理信息系统。系统包括数据管理子系统、模型库子系统和水资源管理子系统。基于人工神经网络的区域水资源压力评价模型被集成在模型库子系统中, 该模型通过水资源压力指数来定量地反映区域水资源状况与区域人口、经济、环境之间的关系是否协调。分别以整个陕西省和陕西省各地市的水资源压力评价为例, 对该系统模型进行了验证。结果表明, 基于 GIS 和人工神经网络的区域水资源压力评价模型具有理论上的可行性和现实意义。最后探讨了基于 GIS 和人工神经网络的区域水资源压力评价模型的应用前景。

**关键词:** GIS; 人工神经网络; 水资源压力; 陕西省

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2007)06-0160-05

**中图分类号:** F323.213

## Evaluation Model and Verification of Regional Water Resource Stress Based on GIS and Artificial Neural Network

WU Pu-zhou, WEI Hai-yan

(College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

**Abstract:** Water resources are a kind of strategic resources and have the vital significance to the regional ecological environment security and sustainable development. This paper utilizes the GIS secondary development technologies to set up an information system for regional water resource management, which includes data management subsystem, model base subsystem, and water resource management subsystem. Evaluation model of regional water resource stress based on the artificial neural network belongs to the model base subsystem and it quantitatively reflects the coordinated degree between regional water resource conditions and regional population, economy, and environment by the water resource stress index. The model is then validated by the case studies for the whole Shaanxi Province and cities in the province. The result proves that it has theoretical feasibility and realistic significance. Its application and the development foreground are discussed finally.

**Keywords:** geographic information system; artificial neural network; water resource stress; Shaanxi Province

水是生命之源, 水资源则是一个国家或地区的战略性资源。然而随着人口数量的不断增长和社会经济的迅速发展, 全球水资源供求矛盾日渐突出, 水资源短缺已经成为许多国家和地区可持续发展的重要制约因素。特别是水资源紧缺的中东、中亚等敏感地区, 水资源可能成为诱发社会冲突的重要因素<sup>[1-3]</sup>。美国学者李斯特·布朗甚至提出中国的水短缺可能动摇世界粮食安全等一系列问题<sup>[4]</sup>。因此, 有不少学者对我国区域水资源压力和区域水资源可持续利用进行了研究,

并提出了一些区域水资源的评价模型和方法, 建立了相应的指标体系。本文在借鉴前人的研究成果之上, 引入水资源压力指数作为定量评价水资源压力的大小, 并以地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术作为支持平台, 建立了基于人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)的区域水资源压力评价模型, 旨在探寻区域经济发展过程中科学评价水资源压力的新方法, 并通过实例分析, 为区域水资源可持续利用和规划提供参考。

收稿日期: 2007-07-11

修回日期: 2007-08-17

资助项目: 国家自然科学基金(40271037); 陕西省自然科学基金(2004D10); 陕西师范大学研究生培养创新基金

作者简介: 吴璞周(1983-), 男(汉族), 陕西省西安市人, 陕西师范大学硕士研究生, 主要从事资源环境与 GIS 方面的研究。E-mail: wpz@stu.snnu.edu.cn.

对于某一特定的地理区域,水资源数量是一定的,如果不与外界进行物质交流,其所能承载的人口数量、经济规模、环境容量就不可能无限地增长,因此,存在着一个极限(阈值)<sup>[5]</sup>。如果现实的人口、经济、环境等与其对应的阈值之间存在着一定距离,说明该区域发展的水资源压力相对较小;反之,该区域发展的水资源压力就较大。水资源压力指数用来表示现实的人口、生态、经济发展等指标与其对应的阈值之间的相对差距,是体现区域水资源状况和区域人口、经济、环境之间的关系是否协调,水资源是否短缺以及水资源是否成为该地区经济发展瓶颈的一种量化指标。

## 1 基于GIS和ANN的区域水资源压力评价模型

### 1.1 GIS技术的应用

地理信息系统按功能和内容可以分为工具型地理信息系统和应用型地理信息系统。工具型地理信息系统也就是GIS工具软件包,如ArcGIS,MapInfo等,具有空间数据输入、存储、处理、分析和输出等GIS基本功能。

应用型地理信息系统是指在工具型地理信息系统的基础上,经过二次开发,建成满足专门用户解决一类或多类实际问题的地理信息系统<sup>[6]</sup>。本文为解决特定的水资源问题,采用组件式GIS二次开发技术,建立区域水资源管理信息系统。系统选用面向对象的可视化编程语言Microsoft Visual C#和能够建立在OCX技术基础上的GIS功能控件ArcObject设计而成。该系统分为3个子系统模块。

(1) 数据管理子系统,主要负责管理和维护数据库中的各种水资源数据,为用户提供数据的录入、存储、编辑、查询、显示及打印输出等功能,同时实现数据库和模型库的连接,供各种模型方便地调用各种数据,达到有效分析的目的。

(2) 模型库子系统,该子系统的功能是实现分析模拟所需的各种水资源模型的集成,包括水资源压力评价模型、循环经济用水模型、水质评价模型等,并实现模型库和数据库的连接。

(3) 水资源管理子系统,主要是实现区域各种用水的管理,例如,取水许可管理,水权水市场的管理,虚拟用水调度等。

其中基于人工神经网络的水资源压力评价模型存在于系统的模型库子系统中,该子系统界面友好,易于操作。用户不必考虑复杂的神经网络内部结构及计算过程,只需方便地选取欲用于评价的指标体系,对于学习过程必要的参数,用户可采用系统智能推荐的默认值,亦可自行调试,这使得对BP神经网络了解不多的用户也完全可能通过程序得到正确满意的评价结果,

并且可以运用GIS本身强大的制图功能将评价结果以专题图的形式输出,使得结果更加直观。

### 1.2 人工神经网络的原理与方法

人工神经网络是一个具有高度非线性的超大规模连续时间动力系统,是由大量的处理单元(神经元)广泛互联而形成的网络<sup>[7]</sup>。目前,应用最为广泛的神经网络模型之一,是由Rumelhart等人提出的前馈网络(back-propagation network, BP)模型,即BP网络模型。研究表明一个3层的BP网络模型能够实现任意的连续映射<sup>[8]</sup>。即输入层、隐含层和输出层。各节点的激活函数本文选择应用比较成熟的Sigmoid型函数。在实际训练时,首先要提供一组训练样本,其中的每个训练样本由输入样本和理想输出对组成。当网络的所有实际输出与其理想输出一致时,训练结束。否则,通过误差逆传播的方法来修正权值使网络的理想输出与实际输出一致。反复学习直至样本集总误差小于预先给定的精度要求为止,此时完成网络训练<sup>[9]</sup>。BP神经网络模型的应用设计,借助于MATLAB软件包中的神经网络工具箱完成<sup>[10]</sup>。

### 1.3 模型的建立及指标体系的构建

本文在研究水资源压力阈值的基础之上,运用水资源压力指数来定量化地评价区域人类活动对水资源造成的压力程度。

设某区域选取 $n$ 个指标进行水资源压力评价,对应的指标值用向量表示为 $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ ,并设指标相应的阈值向量 $P_0 = (P_{01}, P_{02}, \dots, P_{0n})$ ,则该区域的水资源压力指数为

$$S = P/P_0$$

由于水资源压力指数的计算涉及多个评价指标,并且各指标的权重不容易确定,为此,运用具有强大非线性处理能力,并可以通过样本数据学习来确定权重的人工神经网络技术,建立如下的区域水资源压力量化模型<sup>[9]</sup>

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{网络输入层: } \sum_{i=1}^m \text{input}(P_i) \\ \text{网络隐含层: } n_0 = \sqrt{m+n+a} \\ \text{网络输出层: } \sum_{j=1}^n \text{output}(D_j) \end{array} \right.$$

模型中, $P_i \in P, P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ ;  $n_0$ ——为隐含层神经元个数,  $m$ ——为输入层神经元个数,  $n$ ——为输出层神经元个数,  $a$ ——1~10的常数;  $D_j \in D, D = \{S\}$ 。

在此模型中,输入层对应水资源压力评价指标值;隐含层神经元个数的确定尚未有绝对准确的方法,其中的 $a$ 值一般通过反复试验获得;输出层数值即为区域水资源压力指数。整个模型的工作流程如图1。

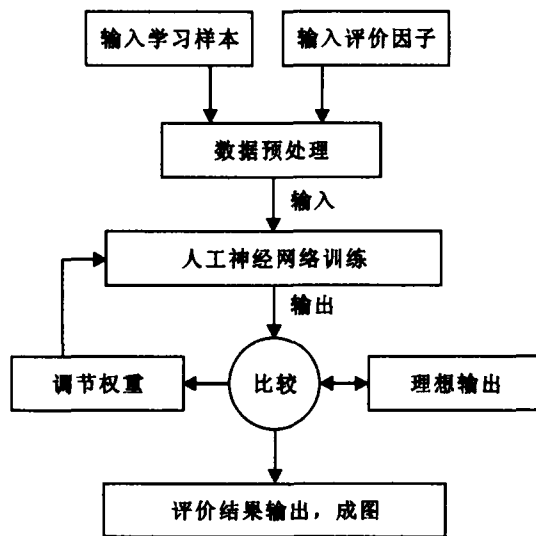


图 1 系统模型流程图

指标因子的选择,对于神经网络模型的建立至关重要,本文依据科学性、动态性、可行性以及简便性原则,选取了影响区域水资源可持续利用的水资源数量、水资源质量、水资源利用及社会经济水平 4 大类

6 项具体指标,作为水资源压力综合评价的基本评价指标<sup>[11-13]</sup>。

水资源压力评价指标临界和理想标准值的确定直接影响到评价结果的准确性、客观性和实用性。作者结合区域经济发展状况,参考国内外评价标准及研究成果<sup>[14-15]</sup>,并征求了相关专家意见,将各指标值划分为 3 等,即最差状态值、合格状态值、理想状态值 3 等级。如表 1 所示。这种划分是随着不同时期,不同区域的科技水平和经济发展规模变化而改变的,这也正体现了水资源压力的动态性。

当各个指标值都达到理想状态值时,可以认为此时水资源无压力,或压力处于相对最小状态,对应的水资源压力指数也最小;当各个指标值都达到合格状态值时,认为此时水资源压力处于相对中等状态,对应的水资源压力指数适中;当各个指标值都为最差状态值时,水资源压力处于相对最大状态,对应的水资源压力指数最大。为了更加直观地进行水资源压力的评价与表达,本文对水资源压力指数进行了定量化分级,如表 2 所示。

表 1 水资源压力评价指标阈值

类型	指标 P	最差状态	合格状态	理想状态
水资源数量	人均水资源量 $P_1/m^3$	$<1\ 700$	$1\ 700\sim 4\ 000$	$>4\ 000$
水资源质量	工业废水达标率 $P_2/\%$	$<60$	$60\sim 95$	$>95$
水资源利用	水资源利用率 $P_3/\%$	$>30$	$20\sim 30$	$<20$
	人均用水量 $P_4/m^3$	$>800$	$400\sim 800$	$<400$
社会经济水平	人均 GDP $P_5/\text{元}$	$<3\ 280$	$3\ 280\sim 32\ 800$	$>32\ 800$
	人均粮食占有量 $P_6/\text{kg}$	$<300$	$300\sim 590$	$>590$

表 2 水资源压力指数分级

等级	水资源压力指数 S	压力状况	水资源状况
I	0.0~0.2	最小	水资源与经济环境发展较协调,无水资源危机
II	0.2~0.6	较小	水资源与经济环境发展不协调,存在水资源压力隐患
III	0.6~0.8	较大	水资源与经济环境发展极不协调,水资源产生危机
IV	0.8~1.0	最大	水资源与经济环境发展严重失调,水资源危机严重

## 2 模型的实例研究

### 2.1 研究区水资源概况

陕西省地处我国内陆腹地,是全国水资源最紧缺的省份之一,水资源总量仅为  $4.45\times 10^{10}\text{ m}^3$ ,人均、单位面积平均占有量分别只占全国平均水平的 53% 和 41%。全省三大经济区域的水资源量分别为:关中  $8.20\times 10^9\text{ m}^3$ ,陕北  $4.84\times 10^9\text{ m}^3$ ,陕南  $3.15\times$

$10^{10}\text{ m}^3$ ,分别占全省水资源总量的 18.4%,10.9%,70.7%。而秦岭以南的长江流域的土地面积只有全省的 35%,水资源量却占  $3.21\times 10^{10}\text{ m}^3$ ,为全省的 72.2%;黄河流域土地面积占全省的 65%,水资源量仅有  $1.24\times 10^{10}\text{ m}^3$ ,占全省的 27.8%。陕西省多年平均降水量为 676.4 mm。降水总趋势是,由南向北递减,由西向东递减,由山区向平原递减。陕北属于旱半干旱大陆性季风气候,多年平均降水量 450~

600 mm, 自南而北递减, 降水多集中在夏季, 多是暴雨形式, 且蒸发强烈。关中地处暖温带季风气候区的西部边缘, 年均降水为 540~720 mm, 水资源补给不足, 7—9 月径流占全年的 60%~70%, 且多以暴雨、霖雨形式出现, 表现出半干旱或半湿润易旱区的降水特征, 造成枯水季节缺水, 丰水季节流失, 加剧了水资源短缺。陕南气候温和, 雨量充沛, 属亚热带气候, 年均降水量约 900~1 600 mm。陕西省地下水天然资源量为  $1.61 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ , 而可开采量为  $5.50 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ 。陕北、关中和陕南地下水资源总量分别为  $2.84 \times 10^9$ ,  $5.34 \times 10^9$ ,  $7.93 \times 10^9 \text{ m}^3$  分别占各地区水资源总量的 61.92%, 68.72% 和 26.56%<sup>[15-16]</sup>。

### 2.2 基于 GIS 和人工神经网络的陕西省及各省市水资源压力评价

建立基于 GIS 的陕西省水资源管理信息系统, 通过调用系统数据库获得上述 6 个指标的原始数据, 首先对其进行极差标准化处理<sup>[7]</sup>, 以消除量纲, 然后建立以标准化处理后的 6 个指标为输入模型的输入统一采用正向指标, 对于负向的指标先取其倒数, 然后再输入。如本文中的水资源利用率和人均用水量为负向指标。水资源压力指数  $S$  为输出的陕西省水资源压力评价人工神经网络模型。

如图 2 所示, 其中  $W_1, W_2$  分别为输入层和隐含层, 隐含层和输出层连接权重。为了建立可靠有效的 BP 网络模型, 并使模型具有更好的泛化能力, 必须生成足够多符合评价标准的训练样本、检验样本和测试样本。本文根据影响水资源压力的指标状态级别, 按如下方式选取样本数据。

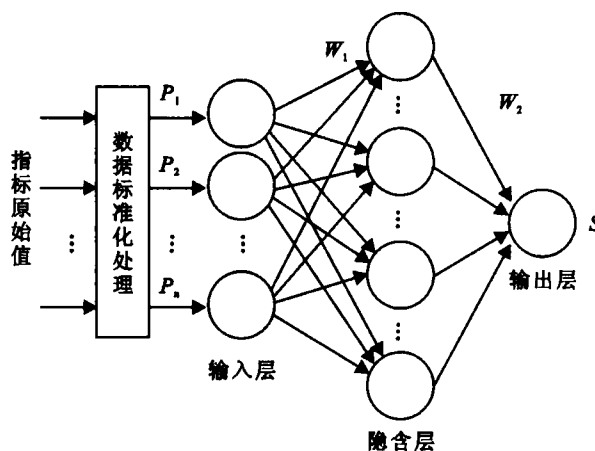


图 2 水资源压力评价人工神经网络模型结构图

设所选取指标理想状态时的值向量为  $P_A = (P_{A1}, P_{A2}, P_{A3}, P_{A4}, P_{A5}, P_{A6})$ ; 在合格状态时的值向量为  $P_B = (P_{B1}, P_{B2}, P_{B3}, P_{B4}, P_{B5}, P_{B6})$ ; 在最差状态时的值向量为  $P_C = (P_{C1}, P_{C2}, P_{C3}, P_{C4}, P_{C5}, P_{C6})$ ; 再设较理想状态时的值向量为  $P_D = (P_A + P_B)/2$ ; 较差状态时的值向量为  $P_E = (P_C + P_B)/2$ ; 分别以  $P_A, P_D, P_B, P_E, P_C$  为输入, 对应的期望输出分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0。运用 MatLab 神经网络工具箱中的 BP 网络学习函数进行模型的训练学习, 网络的拓扑结构为 6-5-1, 其中隐含层神经元个数为 5, 输出层为 1。设置学习参数为: 基本学习速率 0.1, 动量参数 0.6; 通过 2 000 次的学习, 误差满足要求, 达到 0.000 994。分别计算陕西省 2000—2005 年每年的水资源压力指数, 从而进行陕西省近年来的水资源压力评价, 评价结果如表 3 所示。

表 3 2000—2005 陕西省水资源压力指数

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005
水资源压力指数	0.275 58	0.354 49	0.362 61	0.399 18	0.379 42	0.423 74

2000—2005 年陕西省的水资源压力指数在 0.2~0.6 之间, 存在水资源压力的隐患巨大, 除 2004 年由于人均水资源量的减少和水资源利用率的增加导致压力指数下降外, 总体上出现逐年增大的趋势, 水资源与人类经济环境发展不太协调。这一结果符合中国水利部近几年发布的《中国水资源公报》及陕西省水利厅发布的《陕西省水资源公报》, 评价结果真实可信。水资源压力逐年增大的事实, 如果得不到制止, 长期下去将可能引发水资源危机, 最终导致经济社会的不可持续发展, 甚至威胁人类的生存与发展。因此, 陕西省必须进一步加大水资源的有效利用及保护力度, 采取相应措施扭转水资源压力逐年增大的局

面, 实现陕西省水资源与经济社会协调发展。

为了进一步验证该系统模型的可信度, 再利用该系统模型对陕西省各省市 2005 年的水资源压力进行评价, 选择合适的学习参数进行网络训练, 并借助 GIS 强大的图形数据处理功能, 将结果以专题图的形式输出, 如图 3 所示。

由图 3 可直观地看出, 陕西省各省市水资源压力空间差异较大, 水资源压力指数处在 0.224~0.571 之间, 各省市的水资源与人类经济环境发展均不协调。水资源压力指数从南向北呈阶梯状增大, 最小的是汉中市, 为 0.224; 最大的是延安市, 为 0.571。评价结果与 2006 年陕西水利年鉴吻合, 可为各地政府

部门进行水资源的宏观调控和制定可持续发展战略提供一定的参考。

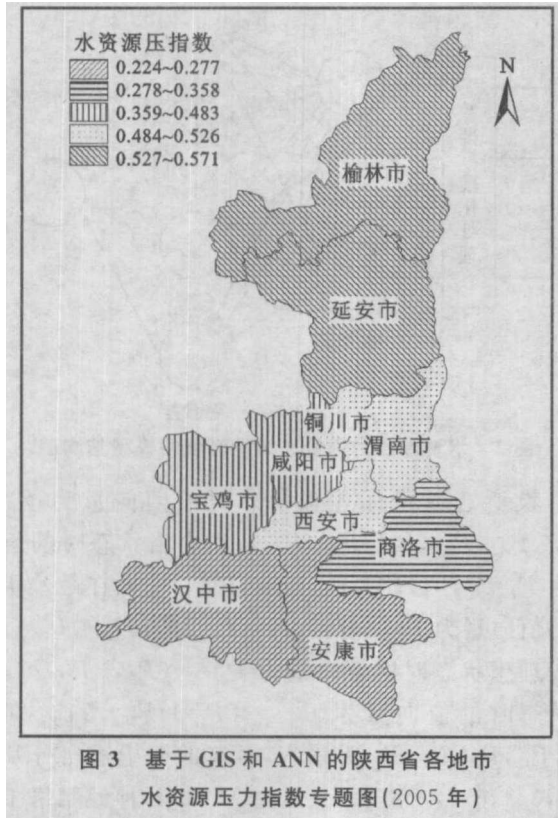


图 3 基于 GIS 和 ANN 的陕西省各地市水资源压力指数专题图(2005 年)

### 3 讨论与结论

将 GIS 技术与人工神经网络有机结合起来进行水资源压力评价时, GIS 作为一个平台, 不仅使得基础数据及资料能够随时随地方便调用, 更为重要的是, 这种结合极大地丰富了 GIS 应用于水资源压力评价的内涵, 实现了其作为单纯的空间数据管理工具到成为水资源管理与评价决策支持系统核心技术的质的飞跃。采用的神经网络方法, 不必了解变量之间的具体关系, 只须根据实际问题确定网络结构, 各评价指标的权重通过训练符合评价标准的样本而得到, 克服了传统评价方法中人为确定指标权重的瓶颈, 具有较好的客观性、可比性和公正性。将 GIS 技术和人工神经网络技术结合评价区域水资源压力的方法是一种新的尝试, 试验表明这种尝试达到了预期的效果, 且具有较高的可信度。它与传统的评价水资源压力的方法相比有着明显的优势。但由于 BP 神经网络自身存在的一些缺陷和不足, 比如网络隐含层的层数和单元数的选择尚无理论上的指导, 只能根据经验或者通过反复实验确定, 这使得网络存在很大的冗余性, 也增加了网络学习的负担; 再者, BP 算法可以使权值收敛到某个值, 但不能保证其为误差平面的全局最小值。这些都可能导致最终评价结果出现差异, 没有一个绝对的惟一的权威定量结果。因此, 目前这种

方法还有待于进一步完善, 才能得到更加客观的评价结果。但可以预见的是该方法的尝试必将对水资源压力的科学评价产生革命性的影响。

#### [参 考 文 献]

- [1] John Waterbury, John Kolars, Masahiro Murakami, et al. Core and Periphery: A Comprehensive Approach to Middle Eastern Water[M]. Oxford University Press, 1997: 180.
- [2] Martin Sherman. The Politics of Water in the Middle East: An Israeli Perspective on the Hydro-Political Aspects of the Conflict[M]. St. Martin's Press, Inc, 1999: 192.
- [3] Philip P Micklin. Water and the New States of Central Asia[M]. Royal Institute of International Affairs, 1997: 60.
- [4] Brown L R, Hilweil B. China's Water Shortage Could Shake World Food Security[J]. World Watch, 1998, 7(8): 10—18.
- [5] 吴季松. 现代水资源管理概论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 67—69, 99—101.
- [6] 黄杏元, 马劲松, 汤勤. 地理信息系统概论[M]. 北京, 高等教育出版社, 2001: 165.
- [7] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 436—456.
- [8] Kitahara M, Achenbach J D, Guo Q C. Neural network for crack-depth determination from ultrasonic back-scattering data[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1992; 11: 701—708.
- [9] 王俭. 基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 139—144.
- [10] 闻新, 周露, 王丹力, 等. MATLAB——神经网络应用设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [11] 贾绍凤, 张军岩, 张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 538—545.
- [12] 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 西北内陆干旱区水资源承载能力研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(2): 151—159.
- [13] 黄初龙, 章光新, 杨建锋. 中国水资源可持续利用评价指标体系研究进展[J]. 资源科学, 2006, 28(2): 33—40.
- [14] 朱一中, 夏军, 谈戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 43—48.
- [15] 楼文高, 刘遂庆. 区域水资源可持续利用评价的神经网络方法[J]. 农业系统科学与综合研究, 2004, 20(2): 113—119.
- [16] 孙晋芳, 伊怀庭. 陕西省水资源开发利用与城镇发展研究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 69—72.
- [17] 员学锋, 汪有科, 吴普特. 陕西省水资源态势及可持续利用策略[J]. 干旱区研究, 2005, 22(4): 448—453.