

# 区域水资源可持续利用评价的神经网络方法

楼文高, 刘遂庆

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 在论述区域水资源可持续利用与水资源承载能力关系的前提下, 提出了区域水资源可持续利用评价的神经网络方法。建立的神经网络模型对汉中盆地水资源可持续利用程度进行了评价。应用实例表明: 建立的模型与其他模糊综合评价和属性识别方法相比, 评价结果更合理可行和可靠。对汉中盆地来说, 城固的水资源可持续利用程度为低级, 其他5个区县的水资源可持续利用程度为中级偏低, 其中又以南郑为最高, 勉县为最低。在研究的7项评价指标中, 水资源利用率对可持续利用程度的影响最大, 灌溉率的影响次之, 生态环境用水率的影响最小, 从而为提高区域水资源可持续利用程度提供了理论依据。表3, 参9。

**关键词:** 区域水资源; 可持续利用; 评价; 神经网络; 汉中盆地

**中图分类号:** F323.213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0068(2004)02-0113-04

## On assessment of sustainable development level of regional water resource using artificial neural networks

LOU Wen-gao, LIU Sui-qing

(School of Environmental Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the discussion of relationship between sustainable developmental level and bearing capacity of regional water resource, an assessment model of sustainable development level of regional water resource (SDLRWR) using artificial neural networks (ANN) was put forward and applied to assess the SDLRWR of Hanzhong Basin. The case study shown that the presented model was more reliable and the assessed results were more reasonable and practicable than that of other methods such as fuzzy and comprehensive mathematics, attribute recognition method etc. The SDLRWR of Chenggu county was low-level and the SDLRWR of other five counties was medium-level. The SDLRWR of Nanzheng county was best in the five counties, and that of Mianxian worst. In the seven evaluation indexes, investigated in this paper, influencing on the SDLRWR, the utilization ratio of water resource was the most important index, then the irrigation ratio of irrigated area to land area, and the eco-environmental water-consumption ratio of the amount of water used in eco-environment to total water was the least important index.

**Key words:** regional water resource; sustainable development level; assessment; artificial neural networks; Hanzhong Basin

人口、资源、环境、生态是当今世界面临的四大问题。水是一种重要的自然资源, 与其它3个问题有着密切的关系并起着不可替代的作用。过去, 水资源的开发利用在很大程度上是粗放型的, 随着生产力的发展, 愈加暴露出了这种开发模式与社会经济、环境生态的不协调性, 如河道断流、地下水漏斗加深、土壤沙化、水体污染、水资源利用率低下等等<sup>[1,2]</sup>。

水资源可持续利用的实施, 除天然的可持续性外, 还需要开发、保护与科学管理, 协调自然与社会关系且取得支撑。水资源系统是自然与社会相互作用的动态系统, 其开发利用程度随着社会经济需求的增长而不断增加, 但这种增加是有限度的, 以

水资源的承载能力为其阈限。水资源承载能力是在一定区域、相当的社会经济、物质生产与生活水平的条件下, 水资源能够持续供给当代人与后代人需求的能力, 在地区分布上有很大差异。我国长江、珠江与闽浙地区水资源比较丰富; 黄河、海河、辽河地区严重不足, 广大西北内陆地区极为贫乏<sup>[3,4]</sup>。

如果水资源的开发利用程度未超过水资源的承载能力, 就具备了水资源可持续利用的基本条件, 它的识别应以地区水资源承载能力的阈值为限度。

但是, 国内外水资源可持续利用的前沿研究大都还停留在概念的提供或定性分析上, 缺乏定量评价的理论和方法。事实上, 只有通过定量分析阐明

收稿日期: 2003-07-24.

基金项目: 上海市教委高等学校科学技术发展基金资助项目(01H03).

第一作者简介: 楼文高(1964-), 男, 浙江杭州人, 在读博士, 教授, 主要从事人工神经网络理论研究及其在环境科学中的应用等。

可持续利用的具体方法和途径, 才能使可持续利用具有可衡量性和可操作性, 从而提出提高水资源可持续利用程度的有效措施和途径, 并选择示范区解决当前水资源的突出矛盾, 具有重要的科学价值, 对我国社会经济可持续发展具有重要意义。

## 1 水资源可持续利用的评价指标及其评价标准

不同区域的水资源可持续利用情况的评价指标不尽相同, 为叙述方便, 现以我国西部地区之一的汉中盆地水资源可持续利用的评价为例进行研究。近些年来, 随着改革开放的逐步深入, 经济迅速发展, 人口骤增, 汉中盆地水资源供需矛盾日益明显, 研究该地区水资源可持续利用的程度, 对进一步开发利用水资源、缓减水资源供需矛盾具有重要意义。

意义。

文献 [3, 4] 对汉中盆地水资源影响因素进行了综合分析, 并在参照全国水资源供需分析的基础上, 提出了评价指标体系, 主要有:

灌溉率  $x_1$ , %: 灌溉面积/土地面积; 水资源利用率  $x_2$ , %: 取 75% 代表年利用率; 水资源开发程度  $x_3$ , %: 取 75% 代表年开发程度; 需水模数  $x_4$ ,  $m^3/km^2$ : 需水量/土地面积; 供水模数  $x_5$ ,  $m^3/km^2$ : 75% 年供给量/土地面积; 人均供水量  $x_6$ ,  $m^3$ : 75% 年供给量/总人口; 生态环境用水率  $x_7$ , %: 生态环境用水量/总水量。

文献 [3, 4] 分别给出了关于上述 7 项指标的 3 级指标标准值和 4 级指标标准值。由于文献 [4] 的 4 级指标区间值和均值混用, 给最后的判别分析带来困难, 为此给出 7 项指标 4 级指标的标准值区间, 见表 1 所示。

表 1 汉中盆地水资源可持续利用综合评价指标及其评价标准

评价指标		指标标准值			
		I (高级)	II (中级)	III (低级)	IV (极低级)
灌溉率 $x_1 \geq$	%	60	40	20	$\leq 20$
水资源利用率 $x_2 \geq$	%	60	40	20	$\leq 20$
水资源开发程度 $x_3 \geq$	%	70	50	30	$\leq 30$
需水模数 $x_4 \geq$	$m^3/km^2$	100	70	40	$\leq 40$
供水模数 $x_5 \geq$	$m^3/km^2$	100	70	40	$\leq 40$
人均供水量 $x_6 \leq$	$m^3$	1 000	2 000	3 000	$\geq 3 000$
生态环境用水率 $x_7 \leq$	%	2	3.5	5	$\geq 5$

汉中盆地水资源利用的有关统计资料列于表 2。应用模糊模式识别和模糊综合评价的结果如表 3 所示。由于上述两种方法在评价时采用的隶属

函数或各指标权重的人为取值不同, 其评价结果也不尽相同。

表 2 汉中盆地各区县水资源利用的统计数据

评价指标		勉 中	汉 中	南 郑	城 固	洋 县	平坝区
灌溉率 $x_1$	%	39.1	37.6	40.3	31.3	32.7	35.8
水资源利用率 $x_2$	%	22.5	26.7	25.6	25.8	28.9	25.7
水资源开发程度 $x_3$	%	43.5	50.3	49.5	48.4	53.0	48.7
需水模数 $x_4$	$m^3/km^2$	95.5	98.4	106.8	76.5	95.2	92.7
供水模数 $x_5$	$m^3/km^2$	46.0	50.7	53.9	36.7	37.7	44.6
人均供水量 $x_6$	$m^3$	1 006.6	885.2	1 225.8	1 102.6	1 032.7	1 041.4
生态环境用水率 $x_7$	%	2	2	2	2	2	2

表3 汉中盆地各区县水资源利用程度不同评价方法的评价结果对比

评价方法	勉中	汉中	南郑	城固	洋县	平坝区
模糊模式识别	2.533	2.439	2.441	2.667	2.506	2.530
模糊综合评价	0.490	0.462	0.463	0.542	0.491	0.488
属性识别方法	2.891	3.122	3.019	2.679	2.931	2.890
神经网络模型输出值	2.555	2.694	2.726	2.372	2.571	2.560
神经网络模型评价结果	中级	中级	中级	低级	中级	中级

## 2 水资源可持续利用程度的神经网络评价方法

### 2.1 人工神经网络模型

人工神经网络是20世纪80年代后迅速发展和获得广泛应用于众多学科的非线性模拟技术<sup>[5,8]</sup>，其中最常用的BP网络由一个输入层、一个输出层和若干个隐（含）层组成，同层之间的节点没有联系，相邻层的节点两两相连，前一层的输出即为后一层的输入，基本运行机制是：由信息正向传播和误差反向传播两个过程组成，工作原理详见文献[5-8]。

### 2.2 BP网络模型建模条件及其存在的不足

BP网络模型好的自学习性、非线性逼近能力和泛化能力并不是其本身所固有的，而是在满足建模条件的情况下所特有的（这一点尤为重要）。文献[9]总结了6项建模条件，即：①对于3层网络，输入层和隐层节点数必须少于 $N-1$ （ $N$ 为训练样本数）；②在满足精度的前提下，取尽可能少的隐层及其节点数；③用从总样本中随机抽取的检验样本来监控训练过程使其在出现“过训练”现象前结束或取出现“过训练”现象前的网络连接权值；④一般情况下，要求训练样本数至少要多于网络连接权值数，通常为2~10倍；样本数少于网络连接权数时，应该用“轮训”方法避免训练时出现“过训练”现象；⑤对于一定的网络结构，应通过不断改变网络连接权值的初始值（一般是几十次）比较系统误差值的大小而得到全局最小值。

如果不符合上述建模条件，建立的神经网络模型极有可能是训练（学习）样本的错误反映。这是因为，BP网络模型存在以下几点不足：①训练过程易进入局部极小点；②网络结构太大是导致训练时极易出现“过训练”现象的直接原因；③网络的泛化能力主要取决于训练样本的特性、多少和隐层及其节点数的多少等因素；④只要隐层节点数足够多，网络的输出总可以以任意精度逼近期望值，但可能没有泛化能力；⑤合理隐层及其节点

数的多少与问题的复杂程度等因素有关，但迄今为止，还没有理论计算公式。

### 2.3 建立BP网络模型的基本原则和步骤

为确保建立的BP网络模型的泛化能力，建模过程必须遵循一定的基本原则和步骤。

**2.3.1** 将收集到的足够多的数据随机分成训练样本、10%以上的检验样本和测试样本3部分。

**2.3.2** 一般取一个隐层。取尽可能少的隐层节点数。对不太复杂的问题用扩张法，否则用节点删除法确定隐层节点数<sup>[5-6]</sup>。目前各种文献提出的确定隐层节点数的计算公式一般不宜直接采用。合理隐层节点数的确定应综合考虑网络结构复杂程度和误差的大小。

**2.3.3** 能随机改变网络初始权值，通过几十或上百次改变网络初始连接权值以求得全局极小点。

**2.3.4** BP网络模型的训练就是通过不断调整网络权值使网络模型输出值与已知的训练样本输出值之间的误差平方和达到最小或小于某一期望值。迄今为止，对在给定有限个（训练）样本的情况下，如何设计一个合理的BP网络模型并通过向所给的有限个样本的学习来满意地逼近样本所蕴含的规律（函数关系）的问题，在很大程度上还需要依靠先验知识和设计者的经验，这个设计过程繁琐而又复杂。判断建立的模型是否已有效逼近样本所蕴含的规律，应该也必须用随机抽取的非训练样本（称为检验样本和测试样本）误差的大小来表示和评价。如果非训练样本的误差和训练样本的误差一样大小或稍大，说明建立的模型已有效逼近样本所蕴含的规律，否则，即使训练样本的误差很小，建立的模型仍没有有效逼近训练样本所蕴含的规律，而只是在这些训练样本点上逼近而已。对于同一网络结构，通过选取多组不同的网络初始权值对网络进行训练，选取没有发生“过训练”时的精度较高的网络连接权值<sup>[8]</sup>。

**2.3.5** 一般地，随着网络结构的增大，模型的误差变小。通常，在增加隐层节点数的过程中，训练样本的误差会出现迅速减小然后趋于稳定的一个阶段，合理隐层节点数应取误差迅速减小后基本稳定

时的隐层节点数。具有合理隐层节点数时的网络连接权值构造的模型就是合理网络模型。

总之,合理网络模型是具有合理隐层及其节点数、训练时没有发生“过训练”现象、求得全局极小点和同时考虑网络结构复杂程度和误差大小的综合结果。

## 2.4 建立汉中盆地水资源可持续利用评价的 BP 网络模型

### 2.4.1 足够多样本的生成。

由于水资源可持续利用 4 级评价标准(由评价指标上限或下限组成)是区分各级利用程度的分界样本,评价指标有 7 个。因此,根据建模条件①,不可能仅用评价标准作为训练样本来建立评价模型。为了建立可靠有效的 BP 网络模型,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。

由水资源可持续利用分级标准知,由各评价指标值的上(下)限值确定不同等级。因此,各项评价指标值都在 II 级利用程度的指标规定的区间内时,即灌溉率  $x_1 \geq 40 \sim 60$ 、水资源利用率  $x_2 \geq 40 \sim 60$ 、水资源开发程度  $x_3 \geq 50 \sim 70$ 、需水模数  $x_4 \geq 70 \sim 100$ 、供水模数  $x_5 \geq 70 \sim 100$ 、人均供水量  $x_6 \leq 2000 \sim 1000$  和生态环境用水率  $x_7 \leq 3.5 \sim 2$ ,水资源可持续利用程度肯定属于 II 级。同理可生成足够多其他各级水资源利用程度的样本。为了使各变量与水资源利用程度的对应关系一致,对人均供水量和生态环境用水率取原值的负数。

在生成的 1 536 个样本中,各随机抽取 150 个样本(约 10%)为检验样本和测试样本。

### 2.4.2 网络模型理论输出值的确定。

为了较精确地实现水资源可持续利用程度分级和能够预测其变化趋势,BP 网络模型采用连续函数输出是一种较好的方案。为此,取对应于 I ~ IV 级可持续利用程度的理论输出值分别为 4、3、2 和 1。

### 2.4.3 网络模型的训练。

采用 Statsoft 公司的 Statistica Neural Networks 软件<sup>[6]</sup>。取学习参数为:学习率  $\alpha = 0.1$ ,冲量  $\eta = 0.3$ (系统缺省值);结束学习的条件是训练样本的均方根误差(RMSE)小于 0.05 或趋于稳定或训练次数达到 2 000 次。隐层采用 Sigmoid 转换函数,输出层采用线性转换函数。根据前述建立 BP 网络模型的基本原则和步骤,隐层节点数为 2 和 1 时的网络训练误差(检验误差和测试误差相似)分别为 0.078 和 0.10,隐层节点数 3 ~ 15 个时误差都在 0.076 ~ 0.078。因此,综合考

虑网络误差大小与结构复杂程度,合理网络结构可取 7-2-1。经过 2 000 次学习,训练样本、检验样本和测试样本的均方根误差(RSME)分别为 0.0786、0.0690 和 0.0736,平均绝对误差(AAE)分别为 0.0509、0.0491 和 0.0491,相关系数分别为 0.9975、0.9981、0.9978。这些指标表明,经训练得到的网络模型对训练样本与对检验样本和测试样本具有相同的拟合(或表征)能力,即该网络模型的泛化能力很强,能较好地用于评价未知样本。

### 2.4.4 分界样本的模型输出值。

将分界值样本的各项评价指标值输入训练好的网络模型,对应的网络模型输出值分别为:3.551、2.404 和 1.815。这样对应于 I ~ IV 级水资源利用程度,其网络模型输出值的范围分别为: $\geq 3.551$ 、(2.404, 3.551)、(1.815, 2.404) 和  $< 1.815$ 。

### 2.4.5 汉中盆地水资源可持续利用程度等级的判定。

将表 2 的汉中盆地各区县水资源利用的统计数据输入到训练好的网络模型,模型输出值分别为:2.555、2.694、2.726、2.372、2.571 和 2.560,对照 I ~ IV 级水资源利用程度的模型输出值的范围可知,除城固县水资源利用程度为低级外,其他 5 个区县为中级利用程度,如表 3 所示。5 个区县的水资源利用程度虽都是中级,但以南郑的利用程度为最高,汉中次之,然后依次为洋县、平坝区和勉县,因此,南郑的水资源规划和可持续开发的一些做法和措施可供其他区县参考。而且,对照水资源中级利用程度的模型输出值范围可知,5 个地区的中级程度是偏低的,离高级利用程度还有很大的差距,说明水资源可持续利用还有很大潜力可挖。

### 2.4.6 汉中盆地水资源可持续利用程度影响因素重要性分析。

根据每个评价指标(影响因素)对水资源可持续利用程度等级的贡献大小,利用 Statistica Neural Networks 软件的变量灵敏度分析功能得到:在分析影响汉中盆地水资源可持续利用程度的 7 项评价指标中,水资源利用率的影响最大,灌溉率次之,然后是人均供水量、供水模数、需水模数、水资源开发程度,影响最小的是生态环境用水率。

## 3 结语

水资源可持续利用程度的评价目前主要有模糊模式识别、模糊综合评价和属性识别方法,由于这些方法的评价结果受人为确定的各评价指标的权重

(下转第 119 页)

而控2肥料的控释材料含有硝化抑制剂,可延缓 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的硝化,降低 $\text{NO}_3^-$ 的形成速率。所以,水稻施用控2尿素的效果最为明显。

#### 2.4 控释尿素对盆栽水稻产量的影响

3种控释尿素能增加水稻的产量,以控2的效果最为明显(表2)。经过 $F$ 检验, $F = 88.49 > F_{0.01} = 6.99$ 差异达到极显著水平,控2的增产效果最好。3种控释尿素比普通尿素增产的原因,主要是由于控释尿素能在水稻的生育后期比普通尿素提供较多的氮肥。蒋彭炎指出:水稻在抽穗后,植株如能继续从土壤中吸收较多的氮素,则茎叶中结构蛋白的降解即可减缓,从而能较长时间地维持一定的叶面积系数和保持较高的叶片光合功能,有利于增加子粒的重量。

表2 水稻的产量 g/盆

处理	重 复				平均	显著性 $F_{0.01}$
	I	II	III	IV		
控2	117.8	110.4	115.0	112.8	114.0	A
控3	92.7	103.5	98.8	101.8	100.3	B
控1	94.9	93.9	90.3	89.1	92.0	C
CK	87.4	85.8	84.1	83.8	84.7	D

### 3 结论

施用3种控释尿素比施用普通尿素氮肥利用率

(上接第116页)

取值方法的影响,客观性和可比性较差,评价结果也列于表3。并且,这些方法在确定各等级的评价标准时都同时混合使用了边界值和均值,这就混淆了概念,一般是不允许的。

采用的神经网络方法,克服了其他3种方法存在的诸如人为确定权重、混用边界值和均值等问题,各评价指标的权重通过训练符合评价标准的样本而得到,具有较好的客观性、可比性和公正性。

应用神经网络方法对汉中盆地水资源可持续利用程度的综合评价表明:城固县水资源可持续利用程度为低级偏好,其他5个区县的水资源可持续利用程度为中级偏差,并以南郑的利用程度为最高,汉中次之,然后依次为洋县、平坝区和勉县。因此,汉中盆地水资源还有很大的开发潜力。

在所分析的影响汉中盆地水资源可持续利用程度的7项评价指标中,水资源利用率的影响最大,灌溉率次之,影响最小的是生态环境用水率。因此,为了提高该地区的水资源可持续利用程度,首先应提高水资源的利用率,其次是提高灌溉率,再

分别提高了3.64、19.92和10.53个百分点。

3种控释尿素能增加黑土的尿素氮残留量。在3种控释尿素当中,以控2的效果最好,其次是控1和控3。水稻黑土当季尿素残留量比对照增加6.80、26.4和6.93个百分点,效果最为明显的是控2。施用控释尿素可以增加尿素氮的残留量,为下季作物提供一定量的氮素营养。

施用控释尿素能明显增加作物的产量。水稻施用3种控释尿素比施用普通尿素平均增加8.66、34.59和18.46个百分点,效果最明显的是控2。

#### 参考文献:

- [1] 韩秉进,崔守富,梁瑞凤,等.碳酸盐黑钙土区井灌水稻氮肥效应研究[J].农业系统科学与综合研究,2001,17(1):79-80.
- [2] 郑圣先,聂军.控释肥料提高氮素利用率的作用及对水稻效应的研究[J].植物营养与肥料学报,2001,7(1):11-16.
- [3] 周瑞庆.应用 $^{15}\text{N}$ 示踪技术研究水稻对氮素的吸收利用[J].湖南农学院学报,1991,17(4):665-669.
- [4] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [5] 符建荣.控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J].植物营养与肥料学报,2001,7(2):145-152.
- [6] 赵凤艳.氮肥用量对蔬菜产量和品质的影响[J].农业系统科学与综合研究,2001,17(1):43-44.

次是降低人均供水量,而降低生态环境用水率对提高水资源可持续利用程度效果最不明显。

#### 参考文献:

- [1] 国务院中国21世纪议程.中国21世纪人口、环境与发展白皮书[M].北京:中国环境科学出版社,1994.
- [2] 中国工程院“21世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目组.中国可持续发展水资源战略研究综合报告[J].中国工程科学,2000,2(8):1-11.
- [3] 高彦春,刘昌明.区域水资源开发利用的阈限分析[J].水利学报,1997,(8):73-79.
- [4] 陈守煜.区域水资源可持续利用评价理论模型与方法[J].中国工程科学,2001,3(2):33-38.
- [5] 阎平凡,张长水.人工神经网络与模拟进化计算[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [6] Statsoft.Statistica Neural Networks[M].Tulsa:Statsoft,Inc.,1999.
- [7] Anderson J A.An Introduction to Neural Networks[M],MIT Press, London,1995.
- [8] Hagan M T, H B Demuth., M Beale.Neural Network Design[M].北京:机械工业出版社,中信出版社,2002.
- [9] 楼文高,王延政.基于BP网络的水质综合评价模型及其应用[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(9):23-26.