

网络出版时间:2014-10-16 13:42

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.11.085

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.11.085.html

基于河流分段与分季节的涑水河水环境容量 计算及模型预测

李 强¹, 白继中^{2,3}, 师 彪⁴, 谭 未³

(1 山西省运城市水资源委员会办公室, 山西 运城 044004; 2 山西水利职业技术学院, 山西 运城 044004;

3 西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048; 4 陕西高新技术研究所, 陕西 西安 710025)

【摘要】【目的】建立适合于干旱和半干旱地区季节性河流的水环境容量计算模式及预测模型。【方法】以山西省涑水河为例, 基于河流分段(上游(横水铁路桥断面以上)、中游(吕庄水库断面至横水铁路桥断面)、下游(吕庄水库断面以下))和分季节(丰水期、平水期、枯水期)的原则, 在传统水环境容量计算模型的基础上, 利用涑水河流域现有的水文资料、环境资料及生态、经济等资料, 探索影响干旱和半干旱地区河流生态环境容量的主要因素, 构建涑水河水环境容量计算模式与自适应调整粒子群-RBF 神经网络预测模型, 并用涑水河流域监测数据、历史资料进行验证。【结果】水体原污染物质量浓度、当前水环境的质量标准、河流距离、河流流量、排放污水量和排放时间是影响干旱和半干旱地区河流生态环境容量的主要因素。在丰水期、平水期、枯水期涑水河 3 个断面之间水环境容量计算值与预测值均非常接近, 计算值相对误差为 0.12%~1.47%, 预测值相对误差为 0.09%~2.02%, 可见计算方法和预测方法的精度均较高。【结论】涑水河水环境容量预测值可用于指导涑水河水资源优化配置和水环境污染控制, 对推动干旱和半干旱地区流域的可持续发展具有积极意义。

【关键词】 水环境容量; 河流分段; 季节性河流; 粒子群算法; RBF 神经网络; 涑水河

【中图分类号】 X522

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)11-0175-08

Sectional and seasonal calculation and model prediction of water environmental capacity of Sushui River

LI Qiang¹, BAI Ji-zhong^{2,3}, SHI Biao⁴, TAN Wei³

(1 Yuncheng Water Resources Committee Office, Yuncheng, Shanxi 044004, China;

2 Shanxi Water Conservancy Vocational and Technical College, Yuncheng, Shanxi 044004, China;

3 State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

4 Shaanxi Institute of High-Tech, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to establish seasonal calculation model and prediction model for water environment capacity suitable for arid and semi-arid watersheds. 【Method】 Based on traditional water environment capacity calculation model, factors influencing the ecological environment capacity of river in arid and semi-arid basins were investigated. Sectional (upstream, midstream, and downstream) and seasonal (plentiful, flat, and withered) water environment capacity calculation model and neural network model with adaptive adjustment of particle swarm-RBF were built using hydrological, environmental, ecological, and economic data of Sushui River Basin. Water monitoring data and historical data of Sushui River were also used to validate the established models. 【Result】 Main factors influencing ecological environment

〔收稿日期〕 2013-10-25

〔基金项目〕 国家科技部创新基金项目(12C26213714122); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20126118110015)

〔作者简介〕 李 强(1969—), 男, 山西盐湖, 高级工程师, 主要从事水文水资源管理研究。E-mail: szbliqiang@163.com

capacity in arid and semi-arid basins included the original concentration of pollutants in water, the current water environmental quality standards, distance to river, river flow, sewage emission and discharge time. The calculated and predicted water environmental capacity values of Sushui River at the three sections and three seasons were very close with calculation relative error and prediction relative error of 0.12%—1.47% and 0.09%—2.02%, respectively. 【Conclusion】 The predicted water environmental capacity of Sushui River can be used to guide water resources optimal allocation of Sushui River and water environmental pollution control. The established calculation model and prediction model have positive significance for the sustainable development of arid and semi-arid basins.

Key words: water environment capacity; river section; seasonal rivers; particle swarm algorithm; RBF neural network; Sushui River

水环境容量是一个重要的环境科学概念,也是地区环境规划和水污染物总量控制规划的一个不可或缺的因素。在空间上,我国多数水环境容量研究的对象是小型河流或大河的局部区域,模型状态多数为稳态和准稳态,解法多数采用解析法。董飞等^[1]在分析一般水环境容量计算方法的基础上,提出基于不同设计水文条件的河流流域水环境容量计算方法,并以我国辽河流域的太子河流域为例进行了实例研究。桑蓉等^[2]在总结国内外河流设计流量研究进展的基础上,比较了常见设计流量的计算方法,并对不同计算方法的适用性进行了分析。在国外,George 等^[3]提出了一种新型算法来遴选 RBF 神经网络基函数中心的最优值,为了实现输入空间的区分,该算法结合了粒子群算法和输入输出模糊分群法,并利用了输出空间的信息。Iman 等^[4]运用 RBF 神经网络和粒子群算法得到最优的数据组,该法在受控状态下,解决了系统的复杂性、非线性以及不确定性等问题。从上述文献可见,国内外在水环境容量和污染控制方面开展了许多研究,取得了一系列研究成果,但在河流生态环境容量和污染控制机理方面研究较少,在生态环境容量智能计算及污染负荷变化趋势预测模型及预测方法方面研究更少。

山西省涑水河是我国北方一条典型的季节性河流,一般 6—9 月流量最大,11—来年 4 月份流量最小,除了中下游城镇排放的污水以外,吕庄水库以下河流基本上无天然径流^[5],其在我国北方有一定的代表性。本研究基于河流分段(上游、中游、下游)和分季节(丰水期、平水期、枯水期)的原则,以涑水河为例,提出适合于干旱和半干旱流域季节性河流水环境容量的计算模式及预测模型,用自适应调整粒子群-RBF 神经网络对涑水河水环境容量进行分步、分段预测,并用涑水河现有监测数据进行验证,以期

为干旱和半干旱地区季节性河流环境容量计算模式及预测模型的确立提供参考。

1 传统的水环境容量计算模型

1.1 河流水环境容量零维模式数学模型

河流水环境容量零维模式数学模型^[6]可以表示为:

$$W_i = 86.4Q_i(C_{si} - C_{oi}) + 0.001K_iV_iC_{si} \quad (1)$$

式中: W_i 为第 i 河段剩余水环境容量, kg/d; Q_i 为第 i 河段设计流量, m^3/s ; C_{si} 为第 i 河段所处功能区水质目标值, mg/L; C_{oi} 为第 i 河段上方河段当前水质值, mg/L; K_i 为第 i 河段污染物降解系数, d^{-1} ; V_i 为第 i 河段设计水体体积, m^3 。

1.2 河流水环境容量一维水质数学模型

河流水环境容量一维水质数学模型^[7]可以表示为:

$$W_i = 86.4 \times [Q_i \times C_{si} \times \exp(K_i \times L_i / (86\,400u_i)) - C_{oi} \times Q_i] \quad (2)$$

式中: W_i 为第 i 河段剩余水环境容量, kg/d; L_i 为第 i 河段长度, m; u_i 为第 i 河段流速, m/s。

河流水环境容量一维水质数学模型与零维模式数学模型的主要区别在于:前者除零维模式的基本参数之外,还有河段长度和河段流速,将一维水质数学模型退化即可得零维模式数学模型。

1.3 传统水环境容量模型存在的问题

由表达式(1)和(2)可知,无论上述零维模式还是一维模式,其适用的前提条件是河流中有天然流量,且顺河污水的排放量小于天然径流量;其次是整条河段无干枯断流现象出现;第三是 2 个模型均未考虑污水自身衰减。对上述 3 个条件,我国南方常年有径流的河流尚可满足,而我国北方大多为季节性河流,通常在枯水期出现断流现象,并且在枯水期河流已成为纳污河,所以本研究需要重新建立适合

于我国北方季节性河流的环境容量计算模式。

2 涑水河水环境容量的计算模式

根据文献[7-9]可知,水环境容量是指河流最大纳污量,水环境容量与水体原污染物质量浓度有关,与当前水环境的质量标准有关,与河流距离、河流流量、排放污水量和排放时间有密切关系。水环境容量与上述变量的关系表达式为:

$$W = f(C_o, C_n, x, Q, q, t)。 \quad (3)$$

$$W_j = \frac{\frac{LK}{u} \left[\frac{W_{\max}}{86\ 400} - C_o Q_0 \exp\left(-\frac{KL}{86\ 400u}\right) \times 365 \times 10^{-6} \right]}{1 - \exp\left(-\frac{KL}{86\ 400u}\right)}。 \quad (4)$$

式中: W_j 为第 j 个排污口允许排放量, t /年; K 为河流中污染物综合降解系数, d^{-1} ; L 为河段长度, m ; u 为河流流速, m/s ; $W_{\max}$ 为涑水河上游水源的水环境容量,通常为河流上游水源的最大负荷量, t /年; C_o 为段首污染物质量浓度, mg/L ; Q_0 为设计流量, m^3/s 。其中,降解系数 K 有如下 2 种求解方法。

1) 利用污染物衰减系数计算。表达式为:

$$K = k_l + \beta \times \bar{u} / H。 \quad (5)$$

式中: k_l 为试验测定的降解系数,即耗氧系数,一般通过试验获得, d^{-1} ; β 为河流坡度系数(流速小于 $0.2\ m/s$ 时,取 0.1 ;流速高于 $0.8\ m/s$ 时,取 0.6); $\bar{u}$ 为河流平均流速, m/s ; H 为最低水位以上的平均水深, m 。

2) 将上游表面污染物质量浓度和下游污染物质量浓度结合在一起,建立与水流速度、上下游水表面污染物质量浓度、河流长度相关的函数并进行计算,其表达式^[11]为:

$$K = \frac{86\ 400u}{L} \times \ln \frac{C_u}{C_d}。 \quad (6)$$

式中: C_u 为河流上断面实测污染物质量浓度, mg/L ; C_d 为河流下断面实测污染物质量浓度, mg/L 。

在使用上述 2 种方法时,可以根据实际条件选用其中一种,或采用 2 种方法分别计算,然后取其最大值或平均值。

2.1.2 中游 吕庄水库至横水铁路桥段之间流域为涑水河中游地区,由于该河段常年有天然来水,即使是枯水期其径流量也达到 $0.1\ m^3/s$,所以采用一维水环境容量计算模型计算水环境容量,其表达式为^[10]:

式中: W 为水环境容量,可用污染物质量浓度乘水量表示,也可用污染物总量表示, kg/d ; C_o 为水中污染物的原有质量浓度, mg/L ; C_n 为水环境的质量标准, mg/L ; x 为距离, m ; Q 为河流流量, m^3/s ; q 为污水排放量, m^3/s ; t 为时间, s 。

2.1 基于河流分段思想的涑水河上、中、下游水环境容量的计算

2.1.1 上游 对于涑水河上游横水铁路桥断面以上,其水环境容量计算模型为^[10]:

$$W_j = 31.54 \times \left[C_i \exp\left(-\frac{k_i x_i}{864u}\right) - C_i \right] (Q_m + Q_n)。 \quad (7)$$

式中: C_i 为沿程污染物的质量浓度, mg/L ; x_i 为计算点到第 i 个节点的距离, m ; C_i 为河段第 i 个节点处的水质本底质量浓度, mg/L ; Q_m 为第 m 个节点处的流量, m^3/s ; Q_n 为第 n 个节点处废水入河量, m^3/s 。

2.1.3 下游 吕庄水库至张留庄断面之间的流域为涑水河下游地区,该段是人口密集区、城镇和企业汇集区及重要农业灌溉区,既有点源污染,又有非点源污染,所以计算水环境容量时,要将面源污染纳入水环境容量计算之中。通常在多点源排污计算的基础上,加上该区该段非点源污染量,由此得到涑水河下游水环境容量的计算模型^[10]为:

$$W_c = S_o (Q_P + \sum_{i=1}^n Q_{Ei}) - Q_P C_P。 \quad (8)$$

式中: W_c 为沿程河段内将非点源也汇入的污染物总负荷量, kg/d ; S_o 为控制断面水质标准, mg/L ; Q_P 为排放的污水量, m^3/s ; Q_{Ei} 为第 i 个排污口污水设计排放流量, m^3/s ; C_P 为河水中污染物的质量浓度, mg/L 。

将面源污染纳入该段水环境容量计算中,其表达式为:

$$W_s = S_o (Q_P + Q_E + Q_s) - Q_P C_P。 \quad (9)$$

式中: W_s 为沿程河段内将非点源也汇入的污染物总负荷量, kg/d ; Q_E 为污水设计排放流量, m^3/s ; Q_s 为控制断面以上沿程河段内非点源汇入的总流量, m^3/s 。

对一定流域,非点源污染是一个动态的变化过程,非点源污染负荷很难准确估算,致使利用式(9)很难求出较为精确的解。因此可根据河流现状、河

床等资料建立适用于有微小径流河流的允许纳污量表达式^[12],即:

$$W_q = 31.536 \times Q_w \times [C_p - C_0 \exp(-Kl/(86.4u))] \quad (10)$$

式中: W_q 为既有点源又有非点源污染时河段水域允许纳污量, kg/d; Q_w 为河流中的污水量, m^3/s 。

对于已完全断流的季节性河流,在枯水季节河流已完全断流,此时河流中的来水全部为多点源污水和非点源污水,此时多种污水排放在一定流域河段,各种污水混合在一起,考虑污水的自衰减性,可以用混合污染物质量浓度计算水环境容量,其表达式为:

$$W_q = 86.4 \times [C_{si} \times (Q_p + Q_h) \times \exp((k_l L_i) / (86.400u_i)) - C_{oi} \times Q_p] \quad (11)$$

式中: Q_h 为另一种不同污水的排放量, m^3/s 。

涑水河中下游地区城镇、工厂较多,农业灌溉面积较大,人口密度较大,但是顺河段污染排放点布局不均,在平水期和枯水期计算水环境容量时需要继续分段计算,以解决水环境容量计算的准确性问题,然后综合分析,其综合表达式为^[13]:

$$W = Q[(C_s \exp((k(1-\alpha_s)L_s)/(86.4u)) - C_p) + (C_s - C_s \exp((-k\alpha_s L_s)/(86.4u)))] \quad (12)$$

式中: C_s 为控制断面水质目标, mg/L; k 为一级综合衰减系数, d^{-1} ; α_s 为河段水质达标比例; L_s 为河段计算单元长度, m。其中,河段水质达标比例 α_s 的计算表达式为^[13]:

$$\alpha_s = \log_{\exp[kl/(86.4u)]} \frac{\exp[kl/(86.4u)] - 1}{kl/(86.4u)} \quad (13)$$

式中: l 为排污口与控制断面之间的距离, km。

河段计算单元长度 L_s 的表达式为:

$$L_s = \frac{1}{(1-\alpha_s)} \ln \left[\frac{CP + (S_s - 1)C_s}{S_s C_s} \right] \frac{86.4u}{k} \quad (14)$$

式中: S_s 为排污口断面平均稀释度。

2.2 基于季节划分的涑水河水环境容量的计算

2.2.1 丰水期 在丰水期(6—10月),涑水河水环境容量采用分段计算然后综合的方式计算,上游水环境容量采用表达式(4)计算,中、下游可以采用表达式(7)计算;然后将3部分各自计算的水环境容量相加即为丰水期整条河的水环境容量。

2.2.2 平水期 在平水期(2—5月),整条河水环境容量也采用先分段计算然后综合的方式计算,上游水环境容量采用表达式(4)计算,中游可以采用表达式(7)计算,下游采用表达式(9)或(10)计算;然后将3部分各自计算的水环境容量相加即为平水期整

条河的水环境容量。

2.2.3 枯水期 在枯水期(11,12月和次年1月),整条河水环境容量仍采用先分段计算然后综合的方式计算,上游水环境容量采用表达式(4)计算,中、下游可以采用表达式(11)或(12)计算;然后将3部分各自计算的水环境容量相加即为枯水期整条河的水环境容量。

3 涑水河水环境容量的预测模型

文献^[14]提出了传统河流流域各段水环境容量的预测方法,其根据河流的水位、流量、规划设计流量以及各河段要达到的水质目标,预测得到各河段污染负荷量、平均流速和水质,然后对水环境容量进行预测。预测准确与否,关键在于预测模型及参数的选择。首先应对流域的支流水环境容量进行预测,再预测干流的水环境容量。但往往由于资料不完备,从而给预测带来困难。如果参数过于精简,则预测效果一般很差,但可以从中分析出该模型的主要数据源,其中对水环境容量影响比较大的因素有各河段污染负荷量、平均流速、水质、河流的水位、流量。

本研究首先对径流、污染负荷以及水质进行预测,再应用历史水环境容量数据,将自适应调整粒子群-RBF神经网络方法引入水环境容量预测之中,提出自适应调整粒子群-RBF神经网络水环境容量预测模型,该模型具有原理简单、受控参数少、收敛速度快等特点,但是所有粒子均根据全体粒子和自身的搜索经验向最优解收敛,易于收敛到局部最优,致使搜索精度不高。本研究在分析传统粒子群算法的基础上,引入速度变系数调整因子和自适应调整惯性权值 $\omega_i^{(k)}$,通过调整飞行速度和相对位置,实现粒子的自适应调整,协调粒子的全局优化与局部优化,形成自适应调整粒子群(AAPSO)算法,用该算法去优化RBF神经网络参数,构成自适应调整粒子群-RBF神经网络水环境容量预测模型。

3.1 AAPSO 算法

根据每个粒子在同一速度的“飞行”方向,依据其不同飞行速度幅值(飞行速度的大小(飞行速率)),对速度幅值大(飞行速率大)的新生粒子进行全局优化,其余粒子进行局部优化。为此,对标准粒子群算法做出以下改进,具体算法如下^[15]:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1^k (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2^k (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (15)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (16)$$

$$\begin{cases} v_{id}^m = a(m)v_{id}^0, \\ x_{id}^m = x_{id}^0 + v_{id}^m, \\ |v_{id}^k| \leq V_{\max} \circ \end{cases} \quad (17)$$

式中: v_{id}^{k+1} 为粒子*i*第*k*+1代的搜索速度分量; ω 为惯性权值; v_{id}^k 为粒子*i*第*k*代的搜索速度分量; c_1 和 c_2 为系数; r_1^k 和 r_2^k 为(0,1)区间随机变量; p_{id}^k 为粒子*i*第*k*代的搜索最佳位置分量; x_{id}^k 粒子*i*第*k*代的搜索位置分量; p_{gd}^k 为所有粒子中第*k*代的搜索最佳位置分量; x_{id}^{k+1} 为粒子*i*第*k*+1代的搜索位置分量; $a(m)$ 为速度变系数调整因子, $m=1,2,3,\cdots,j$,其中*j*为速度间隔数; x_{id}^0 为粒子*i*的基准位置分量; x_{id}^m 为粒子*i*的搜索位置分量, $m=1,2,3,\cdots,j$;

$$\omega_i^{(k)} = \begin{cases} \omega_1 \cdot ((f^{(k-1)}(\max) - f^{(k-1)}) / (f^{(k-1)}(\max) - f^{(k-1)}(\text{avg}))), f^{(k-1)} \geq f^{(k-1)}(\text{avg}); \\ \omega_2, f^{(k-1)} \leq f^{(k-1)}(\text{avg}). \end{cases} \quad (19)$$

式中: $f^{(k-1)}(\max)$ 为第*k*-1代粒子群体中的最大适应度值; $f^{(k-1)}$ 为第*k*-1代要变异粒子个体的适应度值; $f^{(k-1)}(\text{avg})$ 为第*k*-1代粒子群体的平均适应度值; ω_1 和 ω_2 均为自适应控制参数,在(0,1)区间取固定值。

3.2 非线性 RBF 网络的结构与算法

径向基函数神经网络是一种 3 层神经网络,由输入层、隐含层和输出层组成,其数学模型为:

$$y = \sum_{i=1}^{n_c} \omega_i g(\|x - C_i\|_{R_i} / \sigma_i) + b. \quad (20)$$

式中: n_c 为隐含层神经元数目; ω_i 为输出层权重; g 为径向基函数; x 为神经网络输入, $x \in R^n$; C_i 为径向基函数的中心; $\| \cdot \|_{R_i}$ 为输入 x 与 C_i 之间的距离; σ_i 为网络宽度; b 为输出层阈值。

通常选高斯基函数为径向基函数,输出层阈值为 0,该层神经元*i*的输出为:

$$R_i(\omega) = \exp(-\|\chi - C_i\|^2 / 2\sigma_i^2), i=1,2,\cdots,m_0. \quad (21)$$

式中: $R_i(\omega)$ 为神经元的输出向量; ω 为 $n = n_u + n_v$ 维输入向量; m_0 为径向基层(隐含层)神经元数。单输出的 RBF 网络非线性函数的映射关系为:

$$y_k = f(\omega) = MR = \sum_{i=1}^m \omega_i R_i(\omega). \quad (22)$$

表 1 RBF,PSO-RBF 和 AAPSO-RBF 神经网络模型训练性能对比

Table 1 Comparison of RBF,PSO-RBF and AAPSO- RBF neural network algorithms

模型 Model	控制精度 Control accuracy	迭代次数 Iterations	最大相对误差/% Max relative error
RBF	0.05	10 145	9.557
PSO-RBF	0.05	1 125	8.125
AAPSO-RBF	0.05	579	6.814

$V_{\max}$ 为粒子飞行的最大速度。

$a(m)$ 有如下函数关系:

$$a(m) = \begin{cases} m/j, v_{id}^k \geq V_{i1\max}, \\ 1 \pm m/j, V_{i2\min} < v_{id}^k < V_{i1\max}, \\ m, v_{id}^k < V_{i2\min} \circ \end{cases} \quad (18)$$

式中: $v_{i1\max}$ 为粒子*i*前 1 次飞行的最大速度; $V_{i2\min}$ 为粒子*i*前 2 次飞行的最小速度。

ω 的取值对算法影响较大,较大的 ω 有利于全局寻优,加快收敛速度;较小的 ω 有利于局部寻优,提高搜索精度。此处将 ω 表示为分段函数,与适应度耦合,可以实现自适应调整,粒子*i*第*k*代的惯性权值用 $\omega_i^{(k)}$ 表示,其计算表达式为:

式中: y_k 为 RBF 网络输出值; M 是径向基层(隐含层)与输出层间的网络权向量。

3.3 自适应调整粒子群(AAPSO)-RBF 神经网络混合优化算法

神经网络算法本质上是以误差平方和为目标函数,而自适应调整粒子群算法本质上属于全局寻优。因此,利用自适应调整粒子群对 RBF 神经网络参数(输入节点、隐含层节点、径向基函数中心矢量 C_i 、基宽向量 σ_i 、网络权值 ω_i 等)进行优化,再用神经网络算法对所得网络参数组合进一步优化。采用均方误差使其性能指标达到最小,用以下公式衡量其适应值:

$$z_{it} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (f_i - t_k)^2. \quad (23)$$

式中: n 为训练集样本数, m 为输出节点数, f_i 为神经网络的实际输出, t_k 为目标输出。

3.4 AAPSO-RBF 神经网络算法的性能分析

为了评价 AAPSO-RBF 神经网络模型的收敛速度和预测相对误差(相对误差=(试验值-预测值)/试验值 $\times 100\%$),分别采用标准的 RBF 模型、PSO-RBF 模型和 AAPSO-RBF 模型在相同控制精度下进行预测对比,训练结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,在控制精度均为 0.05 的条件

下,BP 模型的迭代次数最大,为 10 145 次,同时其

最大相对误差也最大;AAPSO-RBF 神经网络模型的迭代次数最小,为 579 次,其最大相对误差也最小。可见 AAPSO-RBF 神经网络模型在收敛性和预测精度上性能最优,说明本研究提出的 AAPSO-RBF 神经网络模型性能优于 RBF 神经网络和 PSO-RBF 神经网络。

4 涑水河水环境容量的计算及预测结果分析

4.1 涑水河水环境容量的计算

为了计算涑水河的水环境容量,选择该河 2008—2011 年水质监测数据、排污数据、涑水河现状资料、城镇区划分布、污染源分布、水域功能或水质目标资料、河流水文资料和河床资料(包含河段上、下游流量,有关的支流和渠道流量,大规模排、取水口流量),以及预测目标年内拟削减的污染源情况和河流流域规划资料(指与流域有关的水利工程及区划工程等项目情况,例如水库、堤坝、调水工程、开发区项目),并统计汇总河流流域各段的平均流速和水质预测结果。

表 2 2008—2011 年涑水河 COD 水环境容量 AAPSO-RBF 模型计算值及相对误差
Table 2 Calculated value and relative error of Sushui River COD water environmental capacity from 2008 to 2011 by AAPSO-RBF model

年份 Year	上游 Upstream		中游 Midstream		下游 Downstream	
	计算值/(t·年 ⁻¹) Calculated value	相对误差/% Calculated error	计算值/(t·年 ⁻¹) Calculated value	相对误差/% Calculated error	计算值/(t·年 ⁻¹) Calculated value	相对误差/% Calculated error
2008	444.00	0.13	855.99	0.96	2 699.98	0.35
2009	545.91	0.12	1 016.95	1.14	2 911.98	0.19
2010	690.36	0.96	1 669.24	1.45	2 792.37	0.02
2011	732.82	1.14	1 252.13	1.47	3 785.25	0.86

表 3 2011 年 1—12 月涑水河 COD 水环境容量 AAPSO-RBF 模型计算值
Table 3 Predicted value of Sushui River COD water environmental capacity from January to December 2011 by ACPSO-RBF model

月份 month	上游 Upstream	中游 Midstream	下游 Down stream	月份 month	上游 Upstream	中游 Midstream	下游 Down stream
1	61.40	105.30	316.89	7	126.74	200.92	631.23
2	70.87	114.34	316.69	8	118.16	216.71	630.89
3	37.88	57.63	163.35	9	61.93	104.82	316.20
4	34.13	55.59	160.74	10	64.27	109.28	321.26
5	53.83	73.72	180.98	11	84.71	128.48	340.08
6	28.80	52.26	159.31	12	61.38	105.46	316.70

4.2 涑水河水环境容量预测

4.2.1 数据准备 搜集涑水河 2000—2011 年水质监测数据、各河段污染负荷量、平均流速和水质以及河流的水位、流量、规划设计流量和各河段要达到的水质目标数据,备用。

4.2.2 AAPSO-RBF 神经网络结构的确定 AAPSO-RBF 神经网络结构为 3 层,其输入层节点数为

按照各段水质要求,选择影响涑水河水环境容量的主要因子进行计算。其中影响水质的主要因子有 21 项,即溶解氧、化学需氧量(COD,包括 COD_{Mn}、COD_{Cr})、生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、石油类、挥发酚、汞、铅、总氮、总磷、铜、锌、氟化物、硒、砷、镉、六价铬、氰化物、LAS、硫化物、粪大肠菌群。本研究选取对水环境容量影响较大的前 3 项因子,即 COD、NH₃-N、挥发酚,按 2.2 节方法进行计算,结果表明 2009—2011 年涑水河 COD 水环境容量分别为 1 264.597,1 395.059,1 780.125 t/年;NH₃-N 水环境容量分别为 19.682,20.695,28.368 t/年;挥发酚水环境容量分别为 1.98,2.13,2.947 t/年。

表 2 为 2008—2011 年涑水河 COD 水环境容量分段计算值及其相对误差,表 3 为 2011 年 1—12 月涑水河 COD 水环境容量的分段计算值。表 2、3 表明,本研究建立的干旱和半干旱流域水环境容量计算方式是正确的,计算结果显示按河流分段和按季节分步组合计算,可以得出较为精确的结果。

将 2000—2007 年 8 年的资料(污染负荷量、水

8;隐含层节点数未定,需用上述 AAPSO 优化算法确定;输出层只有 1 个节点,代表预测的该河段水环境容量。AAPSO-RBF 的初始参数分别为: $C_i = 1.2$, $\sigma_i = 0.7$, $w_i = 0.01$;粒子群 $M = 24$,最大进化代数为 1 000。隐层神经元数目由自适应调整粒子群算法优化确定。

质、平均径流、平均流速、河流的水位、流量、规划设计流量、水环境容量)作为训练样本,训练 AAPSO-RBF 神经网络,得到分段 AAPSO-RBF 神经网络理想结构为 8-24-1。

4.2.3 预测结果分析 将 2008—2011 年和 2011 年每月资料(污染负荷量、水质、平均径流、平均流速、河流的水位、流量、规划设计流量、水环境容量)作为预报检验样本数据代入训练好的 AAPSO-RBF 系统,得出相应的各段水环境容量预测结果。反归一化后得到各年(月)各段预报值。表 4 为 2008—

2011 年涑水河 COD 水环境容量预测值及相对误差,表 5 为 2011 年 1—12 月涑水河 COD 水环境容量预测值。综合对比分析表 2~5 可知,在涑水河 3 个断面之间水环境容量计算值与预测值相当,计算结果相对误差为 0.12%~1.47%,预测值相对误差为 0.09%~2.02%,可见计算法和预测法精度均较高。AAPSO-RBF 神经网络预测的涑水河水环境容量与 AAPSO-RBF 神经网络分步、分段预测的结果相当接近,说明该方法是可行的。

表 4 2008—2011 年涑水河 COD 水环境容量 AAPSO-RBF 模型的预测值和相对误差

年份 Year	上游 Upstream		中游 Midstream		下游 Downstream	
	预测值/(t·年 ⁻¹)	相对误差/%	预测值/(t·年 ⁻¹)	相对误差/%	预测值/(t·年 ⁻¹)	相对误差/%
	Predicted value	Predicted error	Predicted value	Predicted error	Predicted value	Predicted error
2008	439.78	1.47	845.67	0.27	2 701.66	0.09
2009	551.04	1.99	1 019.45	0.31	2 910.21	0.23
2010	687.42	2.02	1 665.89	0.49	2 794.77	0.02
2011	729.76	0.27	1 255.65	0.51	3 784.12	0.48

表 5 2011 年 1—12 月涑水河 COD 水环境容量 AAPSO-RBF 模型的预测值

Table 5 Predicted value of Sushui River COD water environmental capacity from January to December 2011 by ACPSO-RBF model							
				t/月			
月份 month	上游 Upstream	中游 Midstream	下游 Downstream	月份 month	上游 Upstream	中游 Midstream	下游 Downstream
1	61.02	106.8	316.81	7	125.79	201.52	631.05
2	70.31	114.83	316.61	8	117.67	217.312	630.71
3	37.39	55.89	163.37	9	61.63	106.13	316.11
4	33.93	57.58	160.73	10	63.87	108.88	321.24
5	52.66	79.02	180.35	11	83.48	131.205	340.31
6	28.75	51.51	159.28	12	61.11	103.825	316.61

5 结 论

- 1)本研究建立了适合于干旱和半干旱流域季节性河流水环境容量的计算模式和预测模型。
- 2)由计算和预测结果可知,涑水河上、中、下游水环境容量计算值与预测值相当接近,计算结果相对误差为 0.12%~1.47%,预测值相对误差为 0.09%~2.02%。
- 3)所建立的干旱和半干旱地区按河流分段,按季节分步组合计算流域水环境容量的方式,可以得出较为精确的结果,与使用 AAPSO-RBF 神经网络分步、分段预测水环境容量的结果非常接近,说明用 AAPSO-RBF 神经网络预测河流水环境容量是可行的。

[参考文献]

[1] 董 飞,彭文启,刘晓波,等. 河流流域水环境容量计算研究[J]. 水利水电技术,2012,43(12):9-16.

Dong F,Peng W Q,Liu X B,et al. Study on calculation of water environmental capacity of river basin [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology,2012,43(12):9-16. (in Chinese)

[2] 桑 蓉,富 国,雷 坤,等. 水环境容量计算中设计流量的选择与应用 [J]. 人民长江,2013,44(5):69-74.

Sang R,Fu G,Lei K,et al. The selection and application in the design flow of water environmental capacity calculation [J]. Yangtze River,2013,44(5):69-74. (in Chinese)

[3] George E T,John T. On training RBF neural networks using input-output fuzzy clustering and particle swarm optimization [J]. Fuzzy Sets and Systems,2013,221:65-89.

[4] Iman P,Reza S,Mansour S. RBF neural network based PI pitch controller for a class of 5-MW wind turbines using particle swarm optimization algorithm [J]. ISA Transactions,2012,51:641-648.

[5] 运城市水资源管理委员会. 运城市地表水资源质量评价报告 [R]. 山西运城:运城市水资源管理委员会办公室,2006.

Yuncheng Water Resource Management Committee. Yuncheng surface water resource quality evaluation report [R]. Yuncheng, Shanxi: Yuncheng Water Resource Management

Committee Office, 2006. (in Chinese)

[6] 王忠训,曹华英,孙 娟,等. 区域环评中北方河流水环境容量计算方法研究 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 2009, 19(3): 22-26.

Wang Z X, Cao H Y, Sun J, et al. Study on the calculation method of water environmental capacity of the north area in the region EIA [J]. Journal of the Environmental Management College of China-Emcc, 2009, 19(3): 22-26. (in Chinese)

[7] 戴本林,杨立中,贺玉龙,等. 四川省某河流水环境容量模型及测算分析 [J]. 节水灌溉, 2007(5): 57-58.

Dai B L, Yang L Z, He Y L, et al. Study on water environmental capacity computation model for a river in sichuan province [J]. Water Saving Irrigation, 2007(5): 57-58. (in Chinese)

[8] 方国华,于凤存,曹永潇. 中国水环境容量研究概述 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(27): 8601-8602.

Fang G H, Yu F C, Cao Y X. Review of water environment capacity in China [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(27): 8601-8602. (in Chinese)

[9] Bedford K W, Sykes R M, Libieki C. Dynamic adjective water quality model for rivers [J]. Journal of Environmental Engineering Division, ASCE, 1983, 109(3): 535-552.

[10] 熊 风,杨立中,罗 洁,等. 我国西部内陆河流水环境容量研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(10): 88-92.

Xiong F, Yang L Z, Luo J, et al. The western continental river water environmental capacity research in our country [J]. Journal of Arid Lang Resources and Environment, 2007, 21(10): 88-92. (in Chinese)

[11] 师 彪,李郁侠,于新花,等. 动态调整粒子群-霍尔特模型在径流预测中的应用 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 8-13.

Shi B, Li Y X, Yu X H, et al. Long-term runoff forecast method based on dynamic adjustment particle swarm optimizer algorithm and Holt-Winters linear seasonal model [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 8-13. (in Chinese)

[12] 于 雷,吴舜泽,范丽丽,等. 河流水环境容量一维计算方法 [J]. 水资源保护, 2008, 24(1): 39-41.

Yu L, Wu S Z, Fan L L, et al. One-dimensional calculation method for river water environmental capacity [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(1): 39-41. (in Chinese)

[13] Smakhtin V U. Low flow hydrology: A review [J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3): 147-186.

[14] 师 彪,李郁侠,于新花,等. 改进粒子群-BP 神经网络模型的短期电力负荷预测 [J]. 计算机学报, 2009, 29(4): 134-138.

Shi B, Li Y X, Yu X H, et al. Short-term load forecast based on modified particle swarm optimizer and back propagation neural network model [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(4): 134-138. (in Chinese)

[15] Dakova S, Uzunov Y, Mandadjiev D. Low flow-the river's ecosystem limiting factor [J]. Ecological Engineering, 2000, 16(1): 167-174.

(上接第 174 页)

[14] 袁 鹏,邵 骏,吕孙云,等. BP 神经网络在洪水地区组成随机模拟中的应用 [J]. 中国农村水利水电, 2008(11): 4-7.

Yuan P, Shao J, Lü S Y, et al. Application of BP network time-sequence model to the integration of flood stochastic simulation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008 (11): 4-7. (in Chinese)

[15] 丁 晶,刘权授. 随机水文学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 74-78.

Ding J, Liu Q S. Statistical hydrology [M]. Beijing: China Water Power Press, 1997: 74-78. (in Chinese)

[16] 水利电力部水文水利调度中心. GB/T 12450—2000. SL 250—2000, 水文情报预报规范 [S]. 北京: 中国水利出版社, 2000.

Water Resources Ministry of Hydrology and Water Resources Dispatch Center. GB/T 12450—2000. SL 250—2000, Hydrology information specification [S]. Beijing: China Waterpower Press, 2000. (in Chinese)