

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220748

PSO-SVM 模型在黑龙江省水资源承载力评价中的应用

王 涛^{a,b}, 李治军^{a,b}

(黑龙江大学 a. 水利电力学院; b. 寒区地下水研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对水资源承载力评价预测涉及多因素综合指标的问题, 采取粒子群算法对支持向量机模型中影响较大的训练参数惩罚因子 C 和核参数 σ 进行优化, 建立了基于 PSO-SVM 的水资源承载力预测模型, 根据指标等级标准构造训练集数据, 对黑龙江省 2017 年水资源承载力进行评价。结果表明, 黑龙江省 2017 年水资源承载力指数位于 0.423 4~0.709 2 之间, 部分地区水资源承载力处于 II 级, 承载能力较弱, 仍有较大提升空间。

关键词: 水资源承载力; 支持向量机; 粒子群算法; 黑龙江省

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)01-0030-04

1 概况

黑龙江省为亚洲与太平洋地区陆路通往俄罗斯和欧洲的重要通道, 是我国沿边开放的重要窗口^[1]。黑龙江省地势大致呈西北部、北部和东南部高, 东北部、西南部低, 主要由山地、台地、平原和水面构成^[2]。黑龙江省属于寒温带与温带大陆性季风气候, 全省从南向北, 依温度指标可分为中温带和寒温带, 从东向西, 依干燥度指标可分为湿润区、半湿润区和半干旱区^[2]。黑龙江省是我国的农业大省, 耕地面积占全省总面积 33.9%, 全省人均耕地面积 0.416 hm², 高于全国人均耕地水平^[2]。由于黑龙江省是我国重要的粮食生产基地, 而农业灌溉多采用地下水, 黑龙江省存在水资源分配不均、水资源开发利用不合理等问题。因此在保障我国粮食供应充足和筑牢我国北方生态安全前提下, 水资源可持续发展问题尤为重要。国外通常将水资源承载力纳入到可持续发展的范畴中进行研究。我国对水资源承载力的研究是将承载力概念与水资源、水环境领域有机结合^[3]。目前, 关于水资源承载力评价预测方法有很多, 但各种方法均有其优势和局限性^[4,5]。支持向量机是一种以统计学中的 VC 维理论和结构风险最小化理论为基础的通用学习方法, 支持向量机拥有全局最优和小样本等特点, 在实际应用中能够更

好地减少主观影响因素, 使评价结果更加客观科学, 但对参数和核函数的选择敏感。为此, 本文采取粒子群算法优化支持向量机模型中影响较大的惩罚因子 C 和核参数 σ , 建立了基于 PSO-SVM 的水资源承载力预测模型, 评价了黑龙江省 2017 年水资源承载力, 获得了一些有益的结论, 可供借鉴。

2 PSO-SVM 模型

2.1 支持向量机原理

支持向量机(SVM)的基本原理为: 设给定样本集 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$, 其中 $x_i \in R^p, i \in 1, 2, \dots, n$ 为 n 个 p 维向量, $y_i \in \{1, -1\}$, 构建回归方程:

$$f(x) = wx + b \quad (1)$$

式中, $f(x)$ 为回归函数返回的预测值; w 、 b 为 SVM 模型中的参数。

将回归问题转化为凸优化问题:

$$\min(\|w\|^2/2) \quad (2)$$

其约束条件为:

$$\begin{cases} y_i - wx_i - b \leq \epsilon \\ wx_i + b - y_i \leq \epsilon \end{cases} \quad (3)$$

式中, y_i 为对应的真实值; ϵ 为不敏感损失函数的误差。

在训练模型中存在一部分正确分类的训练样本数据, 引入松弛变量 ξ_i, ξ_i^* , 则上述问题转化为:

收稿日期: 2022-03-15, **修回日期:** 2022-05-03

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2014BAD12B01-03)

作者简介: 王涛(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文学与水资源工程, E-mail: 1545498984@qq.com

通讯作者: 李治军(1978-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水文与水资源工程, E-mail: lizhijun78@163.com

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i + \xi_i^* \quad (4)$$

式中, ξ_i, ξ_i^* 为松弛变量; C 为惩罚因子。

其约束条件为:

$$\begin{cases} y_i - wx_i - b \leq \epsilon + \xi_i \\ wx_i + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i > 0 \\ \xi_i^* > 0 \end{cases} \quad (5)$$

采用拉格朗日函数对凸优化问题求解:

$$\begin{aligned} L = \min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i + \xi_i^* - \sum_{i=1}^n \alpha_i^* (\xi_i + \epsilon - y_i + wx_i + b) - \sum_{i=1}^n \alpha_i^* (\xi_i + \epsilon - y_i + wx_i + b) - \sum_{i=1}^n (n_i \xi_i + n_i^* \xi_i^*) \end{aligned} \quad (6)$$

根据 KKT 条件可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial b} = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \quad 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C \\ \frac{\partial L}{\partial w} = w - \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) x_i = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) x_i = 0 \\ w(\alpha_i - \alpha_i^*) = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) \cdot (x_i x_j) + \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i + \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) \epsilon \end{cases} \quad (7)$$

式中, α_i, α_i^* 为拉格朗日乘。

将式(4)中所求 α_i, α_i^* 代入式(2)与 $f(x)$ 中得到回归函数:

$$f(x) = \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i x_j) + b \quad (8)$$

在实际应用中训练样本很难进行线性分类, 这时引入核函数 $K(x_i, y_i)$, 将训练样本映射到更高维度空间映射后其目标函数为:

$$g(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n K(x_i x_j) \alpha_i \alpha_j y_i y_j \quad (9)$$

其分类函数:

$$f(x) = \text{sgn} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i K(x_i, x) + b^* \right\} \quad (10)$$

2.2 粒子群算法原理

粒子群算法(PSO)^[6]的基本原理为:设在 N 维空间中有一个 M 个粒子组成的粒子群, 各粒子对其自身速度、位置进行不断调整:

$$\begin{aligned} V_{(t+1)} = \omega V_t(t) + c_1 r_1(t) [P_{i\text{best}}(t) - X_i(t)] + c_2 r_2(t) [P_{g\text{best}}(t) - X_i(t)] \end{aligned} \quad (11)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t) \quad (12)$$

式中, C_1 为单个粒子减速度权重; C_2 为全局加速度权重; $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 为粒子的位置; $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 为粒子的速度; $P_{i\text{best}} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ 为某个粒子在某一时刻的最优位置; $P_{g\text{best}} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 为整个粒子群在某时刻的最优位置。

调节自身最优位置和全局最优位置:

$$\begin{aligned} P_{i\text{best}}(t+1) = \begin{cases} P_{i\text{best}} & f(X_i(t+1)) \geq f(P_{i\text{best}}(t)) \\ X_i(t+1) & f(X_i(t+1)) < f(P_{i\text{best}}(t)) \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P_{i\text{best}}(t) \in \{P_{1\text{best}}(t), P_{2\text{best}}(t), \dots, P_{n\text{best}}(t)\} = \min \{f(P_{1\text{best}}(t)), f(P_{2\text{best}}(t)), \dots, f(P_{n\text{best}}(t))\} \end{aligned} \quad (14)$$

2.3 PSO-SVM 模型原理

通过粒子群算法的不断训练、自我优化能力对核函数 σ 、惩罚因子 C 进行优化, 获得最优解。PSO-SVM 算法计算过程见图 1。

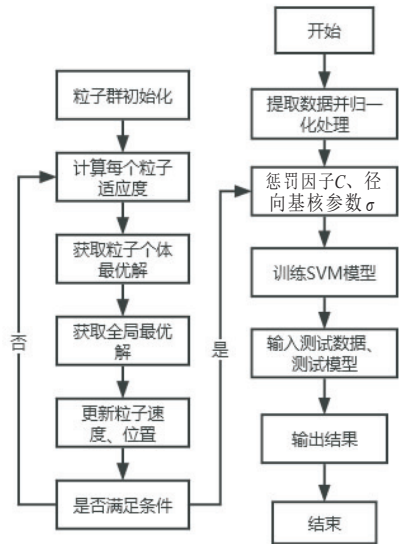


图 1 PSO-SVM 模型原理图

Fig. 1 The schematic diagram of PSO-SVM model

3 实例应用

3.1 水资源承载力指标选取

区域水资源承载力的大小和状态主要受评价指标的体系影响, 本文按照科学性、层次性、独立性、可操作性为主要原则, 参考已有研究成果并结合本省经济、社会、生态等实际情况以社会经济、生态、水资源为一级指标层, 选取人均水资源量、产水模数、供水模数、水资源开发利用等 14 项指标, 建立黑龙江省水资源承载力评价指标体系, 见表 1。

表 1 水资源承载力评价指标

Tab. 1 Evaluation indicators of water resources carrying capacity

准标层	指标	计算方式
水资源系统	人均水资源量 A_1	水资源总量/人口总量
	水资源开发利用率 A_2	供水量/水资源总量
	产水模数 A_3	水资源总量/面积总量
	供水模数 A_4	供水总量/面积总量
社会经济系统	人口密度 A_5	人口总量/面积总量
	城市化率 A_6	非农业人口/农业人口
	人均生活用水量 A_7	生活用水总量/人口总量
	人均 GDP A_8	GDP 总量/人口总量
生态环境系统	万元工业增加值用水量 A_9	工业总用水量/工业生产总产值
	万元 GDP 增加值用水量 A_{10}	用水总量/GDP 总量
	生态环境用水量 A_{11}	生态环境用水量/总用水量
	森林覆盖率 A_{12}	森林面积/总区域面积
	污水处理率 A_{13}	污水处理量/总污水量
	节水灌溉率 A_{14}	节水灌溉面积/总灌溉面积

3.2 评价指标分级

水资源承载力指数是用来衡量区域水资源承载力能力的数值,本文将指标分为 5 个级别,每个级别对应水资源承载力指数。当各指标数值小于较差时认为水资源承载力等级为 I 级,对应水资源承载力指数为 0~0.2。当各数据在较差和及格之间认为水资源承载力等级为 II 级,其水资源承载力指数为 0.2~0.4,其余等级以此类推。评价指标分级见表 2。

表 2 评价指标分级

Tab. 2 Evaluation index classification

指标	较差	及格	良好	优秀	指标	较差	及格	良好	优秀
A_1	500	1 700	2 300	3 000	A_9	300	100	50	20
A_2	60	40	20	10	A_{10}	400	200	100	50
A_3	15	20	30	45	A_{11}	1	2	3	5
A_4	20	15	10	3	A_{12}	10	15	20	30
A_5	300	140	50	25	A_{13}	30	50	70	90
A_6	80	60	40	20	A_{14}	10	30	45	60
A_7	110	90	70	50	V	0.2	0.4	0.6	0.8
A_8	1	2	4	8					

3.3 数据收集与处理

黑龙江省 2017 年 13 个地市各指标数据来源于《黑龙江省水资源公报》、《黑龙江省统计年鉴》、《中国城市建设统计年鉴》、《中国统计年鉴》。为消除量纲之间的相互影响,对其收集数据进行归一化处理。

3.4 模型训练样本构建

将指标评价体系各指标数值作为输入层,承载力指数作为输出层,在相邻等级层间随机生成 30 个样本,共生成 94 个样本,其中选取 64 个样本为训练集,30 个样本作为测试样本构建模型训练样本。部分训练数据见表 3。

表 3 部分训练数据

Tab. 3 Training data

序号	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	V
1	500.00	60.00	15.00	20.00	300.00	80.00	110.00	1.00	300.00	400.00	2.00	10.00	30.00	10.00	0.20
2	583.36	55.82	19.30	15.53	273.86	75.56	100.22	1.07	133.85	358.47	1.17	13.87	42.03	14.70	0.39
3	634.49	53.14	17.83	19.91	170.11	62.78	104.95	1.20	149.93	348.26	1.82	14.65	45.64	28.69	0.22
4	1 525.8	59.32	19.46	17.52	290.06	62.45	95.78	1.04	189.54	225.97	1.81	13.07	48.13	14.85	0.29
5	1 299.5	55.20	18.37	15.56	186.48	60.25	102.28	1.98	239.81	350.19	1.44	11.02	30.46	27.62	0.37
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
94	3 000	10	45	3	25	20	50	8	20	50	5	30	90	60	0.8

3.5 模型参数的确定

通过粒子群算法对核函数 σ 、惩罚因子 C 这两个参数进行寻优处理,经过不断调整最终确定核函数 σ 为 0.135、惩罚因子 C 为 69.5,适应性曲线见图 2。

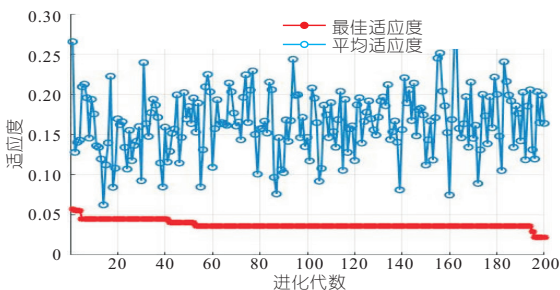


图 2 适应性曲线

Fig. 2 Adaptive curve

3.6 结果分析

通过粒子群算法多次迭代寻优最终确定训练

参数核函数 σ 为 1.35、惩罚因子 C 为 69.5,采用确定最终训练参数数据的支持向量机模型预测了黑龙江省 2017 年各地市水资源承载力,预测结果见表 4。由表 4 可看出,黑龙江省 2017 年水资源承载力评价指数位于 0.423 4(大庆)~0.709 2(大兴安岭)之间,按照水资源承载力评价指数排列依次为大庆、佳木斯、齐齐哈尔、绥化、鸡西、七台河、鹤岗、哈尔滨、双鸭山、牡丹江、伊春、黑河、大兴安岭。除伊春、牡丹江、黑河、大兴安岭等级为 III 级外,其他地市均为 II 级,由此可见黑龙江省水资源承载力上升空间较大。根据各地市生产结构、生态环境、人文社会等因素结合水资源承载力指数进行综合分析,得出结论黑龙江省平原地区耕地面积广大、中部平原地区城市人口较周围山区地形城市人口数量多导致用水量大,存在水资源供需问题。

表 4 2017 年水资源承载力评价结果对比
Tab. 4 Comparison of prediction results of water resources carrying capacity in 2017

地市	PSO-SVM 模型预测值	等级	地市	PSO-SVM 模型预测值	等级
哈尔滨	0.566 9	II	佳木斯	0.472 2	II
齐齐哈尔	0.474 4	II	七台河	0.512 9	II
鸡西	0.507 3	II	牡丹江	0.629 1	III
鹤岗	0.541 9	II	黑河	0.668 5	III
双鸭山	0.583 1	II	绥化	0.485 1	II
大庆	0.423 4	II	大兴安岭	0.709 2	III
伊春	0.641 2	III			

4 结论

a. 本文通过粒子群算法对核函数 σ 、惩罚因子 C 这两个参数进行寻优处理,建立了基于 PSO-SVM 的水资源承载力预测模型,并将其应用于黑龙江省 2017 年水资源承载力评价。

b. 黑龙江省 2017 年水资源承载力指数位于 0.423 4~0.709 2 之间,部分地区水资源承载力

处于 II 级,承载能力较弱,有较大的提升空间。

参考文献:

- [1] 沈娜. 区域合作视角下“一带一路”倡议在东北亚区域的推进研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021: 15-16.
- [2] 席赫阳. 黑龙江省水稻产区耕地土壤肥力变化及培肥措施[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021: 6-12.
- [3] 施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [4] 袁艳梅, 沙晓军, 刘煜晴, 等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 52-56.
- [5] 黄垒, 张礼中, 朱吉祥, 等. 河南省水资源承载力时空特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 54-60.
- [6] SHI Y, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1998: 69-73.

Application of PSO-SVM in Water Resources Carrying Capacity Evaluation of Heilongjiang Province

WANG Tao^{a,b}, LI Zhi-jun^{a,b}

(a. College of Water Resources and Electric Engineering;

b. Cold Groundwater Research Institute, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at the problem that the evaluation and prediction of water resources carrying capacity involves multi-factor comprehensive indicators, particle swarm optimization algorithm was used to optimize the training parameter penalty factor C and kernel parameter σ in the support vector machine model, and a water resources carrying capacity prediction model was established based on PSO-SVM. According to the index grade standard, the training set data was constructed to evaluate the water resources carrying capacity of Heilongjiang Province in 2017. The results show that the water resources carrying capacity index of Heilongjiang Province in 2017 is between 0.423 4 and 0.709 2. The water resources carrying capacity in some areas is at level II, the carrying capacity is weak, and there is still much room for improvement.

Key words: water resources carrying capacity; support vector machine; particle swarm optimization algorithm; Heilongjiang Province

 (上接第 132 页)

Freeze-thaw Test of Steam-cured Concrete Modified by Mineral Admixtures Based on CT Technology

GAO Zhi-han^{a,b}, CHEN Bo^{a,b}, CHEN jia-lin^{a,b}

(a. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering; b. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the influence of mineral admixture on steam-cured concrete under freeze-thaw environment, CT technology was used to scan the steam-cured concrete after freeze-thaw cycle, and the sectional images were obtained. The three-dimensional reconstruction of steam-cured concrete was carried out by Fiji and Avizo software, and the pore structure characteristics of the samples were obtained. The results show that the compressive strength of steam-cured concrete decreases with the increase of freeze-thaw times, and the deterioration of pore structure is the main reason for the decrease of compressive strength; The mechanical properties and pore structure characteristics of steam-cured concrete mixed with mineral powder and fly ash are better than those of ordinary steam-cured concrete under the same freeze-thaw conditions. The mineral powder and fly ash have a certain effect on improving the pore structure of steam-cured concrete.

Key words: steam-cured concrete; freeze-thaw cycle; compressive strength; pore structure; box dimension