

数据驱动的模糊支持向量农业水质评价模型

张慧妍¹, 段瑜¹, 王小艺¹, 许继平¹, 郑蕾²

(1. 北京工商大学 食品安全大数据技术北京市重点实验室, 北京 100048; 2. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875)

摘要: [目的] 针对在线农业水质综合评价中的监测数据噪声及边界模糊问题, 建立具有良好抗扰性和等级划分的综合评价模型。[方法] 提出了基于数据确定投影寻踪指标权重及模糊隶属度参数的支持向量评价模型。采用改进遗传算法对投影寻踪函数进行了优化求解, 获得相对客观的指标权重向量, 而后结合数据优化模糊隶属度参数, 构建模糊支持向量综合评价模型, 以使得监测噪声对评价模型泛化能力的影响减小。此外, 考虑到通用的离散化评价等级分辨率较低, 提出了区域划分信度的概念, 用以辅助说明样本所属区域划分等级的可信程度, 实现对综合评价结果进行细化补充说明的目的。[结果] 评价模型与专家意见及传统评价方法的结果吻合程度较高, 且在监测数据叠加 10% 至 30% 的随机噪声时, 模型仍能保持 85% 以上的一致率, 样本的区域划分可信度均大于临界值, 抗扰效果优于传统模糊综合评价及灰色聚类法。[结论] 本文构建的模型具有较好的可行性与鲁棒性, 能为后续噪声存在条件下农业水质在线实时综合评价提供借鉴与参考。

关键词: 水质评价; 投影寻踪; 模糊支持向量机; 改进遗传算法; 区域划分可信度

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2019)01-0142-05

中图分类号: X824, TP273

文献参数: 张慧妍, 段瑜, 王小艺, 等. 数据驱动的模糊支持向量农业水质评价模型[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1):142-146. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.023; Zhang Huiyan, Duan Yu, Wang Xiaoyi, et al. Data-driven fuzzy support vector model for agriculture water quality evaluation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1):142-146.

Data-Driven Fuzzy Support Vector Model for Agriculture Water Quality Evaluation

Zhang Huiyan¹, Duan Yu¹, Wang Xiaoyi¹, Xu Jiping¹, Zheng Lei²

(1. Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Institute of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] We aimed to solve the problem of monitoring data noise and boundary ambiguity in comprehensive evaluation of agricultural water quality, in order to establish a comprehensive evaluation model with good disturbance resistance and grade division. [Methods] A data-driven fuzzy support vector evaluation method was proposed to determine index weight of projection pursuit index and the parameters of fuzzy membership. Improved genetic algorithm was adapted to optimize the projection pursuit function and obtain the relatively objective index weigh. Then the parameters of fuzzy membership were optimized with data, and a comprehensive evaluation model of fuzzy support vector machine was constructed to reduce the influence of monitoring noise on the generalization ability of the evaluation model. In addition, considering the low resolution of the general discrete evaluation grade, the concept of regional division reliability was proposed to explain the reliability of the regional division grade of the sample, to further explain the comprehensive evaluation results. [Results] The model evaluation results were consistent with the results from experts and traditional evaluation. The model maintained more than 85% consistent rate with the monitoring data with 10%~30% random noise, and the reliability of regional division of samples was greater than the critical value, indicating the reliability and robustness of the method. The results from the constructed model were better than the fuzzy comprehensive evaluation and grey clustering method. [Conclusion] The method

收稿日期: 2018-07-24

修回日期: 2018-09-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“时空大数据驱动的蓝藻水华预测预警方法研究”(61703008); 北京市教委科技计划重点项目(KZ201510011011); 科技创新服务能力建设(PXM2018_014213_000033)

第一作者: 张慧妍(1973—), 女(汉族), 副教授, 博士, 黑龙江省齐齐哈尔市人, 主要从事农产品相关水质的评价与预测、预警算法研究。
E-mail: zhanghuiyan369@126.com.

proposed by the present study is feasible and robust, and it can provide a reference for real-time evaluation of agricultural water quality under the condition of subsequent noise.

Keywords: evaluation of water quality; projection pursuit; fuzzy support vector machine; improved genetic algorithm; reliability of region division

农业水质与农产品生产安全密切相关,对其进行监测与评价为从源头保障生态农业建设提供支撑。农业在线水质监测一般在野外进行,环境影响因素众多,测试数据携带噪声是不可避免的。因此,构建抗扰性较强、实用性较好的农业水质综合评价模型,与实时监测设备结合,将有利于进行自动、实时评价,以避免由于监测不及时,任由水质恶化引发农作物污染等问题。

借鉴以往综合评价方法可在一定程度上对解决农业水质评价面临的噪声等不确定性有所裨益。其中,模糊数学^[1-2]可以恰当表达、计算难以量化的模糊信息,为农业水质评价问题提供了一种可行的解决思路,但如何避免主观因素对参数的影响还需要注意。投影寻踪法^[3-4]通过考察数据投影方向的积聚与离散特征以实现数据降维目的,其投影值权重可作为综合评价的基础,但寻求简单、有效的求解方法是投影寻踪法实际应用中必须解决的前提条件。灰色理论^[5-6]则是针对数据量少、信息贫乏问题的一种实用不确定信息处理手段,与其他算法融合有可能发挥其优势并拓展应用。

此外,余勋等^[7]针对水质评价过程中模型结构的参数不确定性,建立融合三角模糊数的贝叶斯模糊综合评价模型,对不确定性的刻画更为全面、符合实际。巩奕成等^[8]为解决水质评价中的数据模糊性与指标不相容性,引入萤火虫算法,优化寻求最佳投影方向,实现合理评价的目的。梁中耀等^[9]则基于二项分布检验法定量表征了变量不确定性可能导致的决策风险,研究结果更具鲁棒性。

本文拟依据农业水质评价标准,结合监测数据,探索在监测噪声情况下,建立具有良好抗扰性和等级划分的综合评价模型。采用投影寻踪法求得各评价指标的优化权重;数据驱动优化确定三角形隶属度参数,进而构建模糊支持向量机评价模型有效地解决农业水质监测数据中存在的噪声问题。此外,提出的等级划分可信度,以期有效度量综合评价等级可信的程度,提高等级划分分辨率,为全面考察综合评价结果提供一个新的视角。

1 评价方法

1.1 指标权重确定

多指标综合评价中各指标权重的科学确定,对于评价结果的客观、公正具有重要意义。投影寻踪

(projection pursuit, PP) 函数^[10-11]是从评价指标数据特征出发来确定指标权重的方法,可有效避免权重确定中的主观性和随意性。

投影寻踪法指标权重确定过程如下:

首先,利用 PP 函数将无量纲处理后^[13]的 m 维数据 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ 变换为以 $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m)$ 为投影分向量的一维特征值 $z_i = x_i \sigma^T$, 得到 $z = (z_1, z_2, \dots, z_l, \dots, z_l)$ 。而后通过 z 的标准差 $S(z)$, z 与其对应的水质经验等级 $g = (g_1, g_2, \dots, g_l)$ 的相关系数绝对值 R_{zg} 定义投影指标函数 $Q(\sigma)$ 。即:

$$Q(\sigma^*) = \max Q(\sigma) = S(z) R_{zg} \quad (1)$$

$$s. t. \sum_{i=1}^m \sigma_i^2 = 1 \quad (2)$$

$$S(z) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (z_i - \bar{z})^2}{l}}$$

$$R_{zg} = \left| \frac{\sum_{i=1}^l (z_i - \bar{z})(g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^l (z_i - \bar{z})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^l (g_i - \bar{g})^2}} \right|$$

PP 函数的求解 σ 实质上是一个非线性优化问题,存在计算复杂,模型优化求解困难等问题。适于非线性问题优化求解的遗传算法(genetic algorithm, GA)^[12]存在易陷入局部最优,稳健性不好等弊端。本文提出改进算法,其主要思想为扩充、倍增备选解集,每次迭代过程中最优解被强制保留在备选解集中,解决了最优解可能丢失的缺点,并增强了模型求解的稳健性。

在实际应用中,通过计算机算法求解 σ 实现多指标权重的客观确定,具有较好的适用性,在指标增加是可以仅需修改对应权重向量的维度,快捷、方便地计算给出新的数据驱动权重结果。

1.2 模糊支持向量机

支持向量机(support vector machine, SVM)在非线性分类及高维模式识别中表现出特有的优势^[14-16]。选择 SVM 是期望能够利用其结构风险小,泛化能力强的特点来提高模型的抗噪声干扰特性。

由于传统 SVM 对孤立点反应敏感,而野外在线监测获得的数据常常伴随噪声、野值,且综合评价研究中认为等级边界渐变较为合理。因此,本文采用模糊支持向量机(fuzzy support vector machines, F SVM)^[17-20]尝试对上述问题予以解决。通过合理设置隶属度对样本点实现差异化与模糊化^[21-22]以提高

评价精度。

在农业水质综合评价中,评价指标之间存在着复杂的非线性关系,因此,需要利用核函数 $K(x_i, x_j)$ 映射变换。模糊训练样本集为: $T = [\varphi(x_i), y_i | i = 1, 2, \dots, l]$, 其中样本 $x_i \in R^m$, $\varphi(x_i)$ 为经过核函数变换的样本指标, 评价标签 $y_i \in \{-1, +1\}$, 隶属度 $f_i \in (0, 1]$, 为降低样本错分的几率, 需要设置惩罚参数 C 。则 FSVM 优化目标和约束条件如下:

$$\max \sum_{j=1}^l a_j - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l y_i y_j a_i a_j K(x_i, x_j) \quad (3)$$

$$s. t. \sum_{i=1}^l y_i a_i = 0 \quad (0 \leq a_i \leq f_i C, i = 1, 2, \dots, l) \quad (4)$$

式中: ω ——分界面向量; b ——阈值; ξ_i ——第 i 个样本的松弛变量。求得对应的优化 Lagrange 乘子 a_i^* 和评价阈值 b^* , 则判别函数值为 $k_i = \sum_{i=1}^l y_i a_i K(x_i, x) + b$, 进而最优评价超平面决策函数为:

$$f(x) = \text{sgn}[\sum_{i=1}^l y_i a_i^* K(x_i, x) + b^*] \quad (5)$$

为简化起见本文构建的 FSVM 选用三角模糊隶属度, 1 隶属度值对应为农业水质等级评价标准中对应等级的区间中心值; 而对应的 0.5 隶属度的值, 则需结合需要划分等级的建模数据方差设定。

2 评价结果的可信度

为了较精细地刻画评价等级结果, 本文综合 FSVM 的判别函数值 k_i , 隶属度 f_i , 评价标签 y_i , 引入区域划分可信度 δ_i 作为评价补充, 使得评价结果更加全面、易于理解。在采用 FSVM 评价时, 每构建一次评价超平面, 参与评价的样本就会产生一个对应的区域划分可信度。构建超平面时的样本区域划分可信度具体定义如下:

$$\delta_i = \frac{(e^{-r_i} + k_i^* f_i)^p}{2^q} \quad (6)$$

式中: k_i^* ——样本点与评价超平面的距离的 k_i 归一化的值, 即 $k_i^* = \frac{|k_i| - |k_{\min}|}{|k_{\max}| - |k_{\min}|}$; f_i ——当前样本对应的隶属度对评价超平面的调整程度; r_i ——样本的评价标签与判别函数值 k_i 差的绝对值, 即 $r_i = |y_i - k_i|$; p ——分子校正参数; q ——分母校正参数, $p \in [1, 10]$, $q \in (0, 1]$ 。

由公式(6)可知区域划分可信度由两部分构成, 一部分体现了模型离散评价等级的偏差; 另外一部分综合了判别函数值与隶属度, 体现了 FSVM 评价结果的精确范围。校正参数 p, q 应使公式(6)中的分子与分母的数量级一致。 p 和 q 的存在, 保证了模型参数在一定范围内可以做出调整以适应不同的具体

情况。文中选取 $p=1, q=1$ 。

分析可知, 当 r_i 趋于 0, 且 k^* 与 f 越大时, $\delta_i \in (\frac{e^{-r_{\max}}}{2}, 1)$, 且越接近 1, 表明评价超平面划分明显, 即此组样本的各项评价指标都相对符合对应区域, 评价结果比较可靠; 反之, 当 r 处于最大值即 $r=r_{\max}$, 且当 k^* 或 f 无限趋于零, 即区域划分可信度 δ_i 无限接近 $\frac{e^{-r_{\max}}}{2}$ 时, 评价结果可信度较小, 表明对应样本虽然评定属于该对应区域, 但仍较接近其他临近区域。

应用中每经过一次超平面划分, 参与划分的样本就会按公式(6)计算出其相应的区域划分可信度。这样, 通过比较每组监测数据所得的区域划分可信度, 了解评价结果的可信任程度, 有效弥补了现行离散评价结果分辨率较低的不足。

3 仿真及实测验证

参考国家农田灌溉水质标准并且结合太湖流域的水域环境, 本文选取盐度、氯化物、氨氮、溶解固体作为监测指标, 将水质等级分为 I 级(优)、II 级(良)、III 级(中)、IV 级(差), 具体评级标准见表 1。

表 1 农业水质等级评价标准

评价指标	I 级优	II 级良	III 级中	IV 级差
盐度/(mg · L ⁻¹)	<10	10~20	20~30	>30
氯化物/(mg · L ⁻¹)	<3.5	3.5~8	8~12	>12
氨氮/(mg · L ⁻¹)	<0.02	0.02~0.08	0.08~0.15	>0.15
溶解固体/(g · L ⁻¹)	<1.5	1.5~3	3~4.5	>4.5

首先根据表 1 水质等级评价标准产生虚拟样本序列^[23], 每个等级随机产生 5 组数据, 即共生 20 组标准水质样本, 同时为了增加样本代表性, 本文将指标处于等级区间临界值的水样定义为中间水质等级, 见表 2 的第 6, 12, 18 组数据。

如指标权重确定采用改进 GA 算法对 PP 函数求解, 求得的投影权重 $\sigma = (0.108 1, 0.442 6, 0.805 7, 0.378 5)$ 。

多次试验尝试表明, 本研究数据在设定 FSVM 中的 0.5 隶属度对应与 1 隶属度相差为 $\sqrt{0.5}$ 倍建模数据方差时, 抗噪效果较好。后续通过 3 次超平面划分(结果见表 2), 构建了 4 等级评价模型。采用公式(6)细化临界值样本评价结果, 对应等级的区域划分可信度均在 0.7 左右, 表明模型的划分效果较好。

为验证模型评价效果, 在相同条件下随机生成 40 个样本(每级 10 个)进行评价, 测试结果正确的为 39 个, 评价结果与水质经验等级的一致率为 97.5%,

而采用传统的灰色聚类法和模糊综合评价法对虚拟测试样本序列进行对比评价,两种对比方法的一致率为 95%和 92.5%,说明使用本模型的评价结果可以

推广应用,精度较高。

进一步,选取太湖流域用于农业灌溉的 20 个水质监测样本进行实测检验,最终评价结果详见表 3。

表 2 农业虚拟水质样本、经验等级及模型评价结果

水样	盐度/ (mg · L ⁻¹)	氯化物/ (mg · L ⁻¹)	氨氮/ (mg · L ⁻¹)	溶解固体/ (g · L ⁻¹)	经验 等级	FSVM 评价结果及其区域划分可信度			
						模型拟合等级	δ ₁	δ ₂	δ ₃
1	6.680 8	1.113 6	0.001 3	0.544 5	1	1	0.771 2		
2	9.969 9	1.987 3	0.002 0	1.077 0	1	1	0.255 3		
3	0.196 6	1.721 5	0.014 4	0.796 3	1	1	0.737 0		
4	8.616 4	0.506 4	0.016 7	0.353 6	1	1	0.732 1		
5	1.656 8	2.687 3	0.009 7	1.335 8	1	1	0.798 6		
6	10.00 0	3.500 0	0.020 0	1.500 0	1.5	2	0.244 4	0.596 4	
7	17.785 5	5.363 8	0.046 1	2.573 2	2	2	0.766 3	0.267 1	
8	19.804 1	4.266 0	0.050 9	2.113 3	2	2	0.766 1	0.299 6	
9	15.971 5	3.681 9	0.071 2	2.637 7	2	2	0.766 3	0.385 8	
10	11.332 9	5.622 1	0.050 4	1.776 5	2	2	0.753 1	0.546 3	
11	14.376 9	5.869 7	0.045 6	2.768 7	2	2	0.716 8	0.498 2	
12	20.000 0	8.000 0	0.080 0	3.000 0	2.5	2	0.758 1	0.267 0	
13	21.789 1	8.224 7	0.119 7	3.656 4	3	3	0.753 8	0.717 8	0.976 1
14	22.874 0	11.228 7	0.146 1	4.319 2	3	3	0.754 0	0.723 9	0.890 4
15	24.330 8	10.249 5	0.133 9	3.992 0	3	3	0.753 8	0.720 3	0.920 9
16	29.913 1	11.066 2	0.130 2	4.006 1	3	3	0.756 6	0.736 4	0.495 1
17	26.457 1	9.475 7	0.145 7	3.768 7	3	3	0.756 7	0.715 8	0.728 9
18	30.000 0	12.000 0	0.150 0	4.500 0	3.5	4	0.758 2	0.734 4	0.250 9
19	35.974 3	12.887 5	0.188 1	5.687 9	4	4	0.750 7	0.709 6	0.975 8
20	31.317 2	15.651 4	0.157 8	4.989 9	4	4	0.757 4	0.724 0	0.667 7
21	33.239 1	14.428 4	0.150 7	4.843 1	4	4	0.757 0	0.723 1	0.704 0
22	30.464 7	18.460 3	0.190 0	5.823 7	4	4	0.751 4	0.711 7	0.974 9
23	37.223 7	18.137 3	0.162 9	5.711 5	4	4	0.761 4	0.712 0	0.899 9

表 3 农业水质等级评价实例数据与不同评价方法的评价结果

水样	盐度/ (mg · L ⁻¹)	氯化物/ (mg · L ⁻¹)	氨氮/ (mg · L ⁻¹)	溶解固体/ (g · L ⁻¹)	灰色聚类 法等级	模糊综合法 评价结果	FSVM 评价结果及其区域划分可信度			
							评价等级	δ ₁	δ ₂	δ ₃
1	4.829 3	1.015 0	0.020	1.125 9	1	1	1	0.718 0		
2	2.880 8	2.180 0	0.020	0.155 6	1	1	1	0.452 1		
3	6.258 2	3.802 2	0.015	1.014 2	1	2	1	0.588 8		
4	7.417 5	2.048 2	0.020	0.966 3	1	2	1	0.452 1		
5	6.686 0	3.601 0	0.022	0.319 5	1	2	1	0.855 3		
6	15.998 5	5.059 1	0.060	2.720 2	2	2	2	0.752 0	0.747 0	
7	8.562 5	7.669 8	0.040	2.021 5	1	2	2	0.770 8	0.563 4	
8	18.156 1	5.088 6	0.070	2.777 2	2	2	2	0.876 0	0.532 6	
9	11.887 4	5.352 6	0.080	2.670 5	2	2	2	0.739 8	0.589 2	
10	9.584 1	6.741 2	0.060	2.921 5	2	2	2	0.796 5	0.501 5	
11	19.386 2	11.218 5	0.080	3.668 1	3	3	3	0.606 8	0.874 3	0.630 1
12	22.637 9	9.330 2	0.120	3.941 2	3	3	3	0.938 9	0.633 1	0.258 5
13	26.469 3	10.519 5	0.090	3.419 8	3	3	3	0.806 0	0.498 7	0.531 7
14	23.414 8	9.214 2	0.130	3.056 5	3	3	3	0.564 0	0.498 4	0.302 7
15	25.442 1	9.869 7	0.100	3.731 7	3	3	3	0.839 4	0.514 6	0.365 0
16	35.339 0	15.303 9	0.180	6.262 2	4	4	4	0.877 0	0.571 3	0.872 0
17	35.302 0	21.433 7	0.220	4.413 4	3	4	4	0.837 0	0.627 4	0.843 2
18	33.198 5	23.715 3	0.250	6.254 3	4	4	4	0.627 7	0.515 4	0.833 0
19	41.132 7	16.277 0	0.180	4.857 5	4	4	4	0.789 2	0.507 4	0.603 1
20	32.049 2	23.690 7	0.200	4.375 8	3	4	4	0.622 0	0.873 5	0.650 1

其中,水样 7 的盐度属于 1 级,而其他指标均属于 2 级,由于盐度权重较小,故最终模型评价此样本为 2 级,其区域划分可信度;水样 5 的氨氮含量属于 2 级,但计及其他污染物综合考量,最终被模型评价为 1 级水,其区域划分可信度。3 次构建评价超平面的评价区域划分可信度的无效临界值分别为 $\delta_1 = 0.4389$, $\delta_2 = 0.3743$ 和 $\delta_3 = 0.2216$, 易知可信度均大于无效临界值,水质综合评价结果可信。

为了进一步考察模型的抗噪稳定性,在实测样本中分别加入 10%, 20%, 30% 范围的随机噪声进行测试分析。表 4 表明,在较低的随机噪声条件下,本文模型和模糊综合法的评价结果基本不受影响,而灰色聚类法模型则出现错评情况;在 20%, 30% 的噪声条件下所有模型均出现错评,但本文的 FSVM 模型的错评数少于对比模型。说明本文提出综合评价模型评价精度较高,抗噪能力较强。

表 4 加噪条件下模型的评价结果对比分析

噪声等级	灰色聚类法错评数	灰色聚类法一致率	模糊综合法错评数	模糊综合法一致率	FSVM 错评数	FSVM 一致率
10%	2	90%	0	100%	0	100%
20%	3	85%	3	85%	1	95%
30%	3	85%	4	80%	3	85%

此外,实际应用中存在监测数据突然变化是由于自然条件的改变而引起的,若模型参数恒定则不能区分随机噪声和真正的环境条件变化。因此,模型应用时需要与实时监测设备结合,存储采集数据,通过合理设定模型参数更新时长以尽快捕获水质的静、动态特性,为甄别随机噪声与自然条件的变化提供理论与技术支撑。

4 结论

针对农业水质综合评价中监测数据存在噪声影响模型判别准确性,及常用评价的 4 等级划分精度相对粗糙问题,本文提出数据驱动的 FSVM 评价模型。首先通过改进 GA 算法求解 PP 函数快速稳健地实现了指标权重优化;而后对 FSVM 模糊隶属度进行优化确定,经过 3 次构建评价超平面实现了 4 个等级有效换份,减小了噪声的影响;最后,通过引入综合评价区域可信度,用来表征模型评价结果的可信赖程度,为离散等级进一步细化描述提供了参考。文中提出的综合评价模型构建方法具有计算量小,训练速度快、稳健性好、区域可信度较高等优点,实例验证了模型的可行性与有效性。

[参 考 文 献]

- [1] Ding Xiaowen, Chong Xiao, Bao Zhengfeng, et al. Fuzzy comprehensive assessment method based on the entropy weight method and its application in the water environmental safety evaluation of the Heshangshan drinking water source area, Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Water, 2017; 329(9); doi:10.3390/w9050329.
- [2] 高学平,孙博闻,訾天亮,等.基于时域权重矩阵的模糊综合水质评价法及其应用[J].环境工程学报,2017,11(2):970-976.
- [3] 姜秋香,付强,王子龙.基于粒子群优化投影寻踪模型的区域土地资源承载力综合评价[J].农业工程学报,2011,27(11):319-324.
- [4] 金菊良,吴开亚,郇建强.巢湖水质安全评价的对应分析和投影寻踪熵耦合方法[J].四川大学学报:工程科学版,2007,39(6):7-13.
- [5] 于倩雯,吴凤平.面板数据下水资源安全的灰色聚类评估[J].科技管理研究,2016,36(19):64-69.
- [6] 刘东,龚方华,付强,等.基于博弈论赋权的灌溉用水效率 GRA-TOPSIS 评价模型[J].农业机械学报,2017,48(5):218-226.
- [7] 余勋,梁婕,曾光明,等.基于三角模糊数的贝叶斯水质评价模型[J].环境科学学报,2013,33(3):904-909.
- [8] 巩奕成,张永祥,丁飞,等.基于萤火虫算法的投影寻踪地下水水质评价方法[J].中国矿业大学学报,2015,44(3):566-572.
- [9] 梁中耀,张雨宇,钱松,等.基于二项分布检验法的水质达标评价方法研究[J].环境科学学报,2017,37(1):339-346.
- [10] 陈曜,丁晶,赵永红.基于投影寻踪原理的四川省洪灾评估[J].水利学报,2010,41(2):220-225.
- [11] Lan Young, Gropp K, Fazil A, et al. Knowledge synthesis to support risk assessment of climate change impacts on food and water safety: A case study of the effects of water temperature and salinity on *Vibrio parahaemolyticus*, in raw oysters and harvest waters [J]. Food Research International, 2015,68:86-93.
- [12] Feng Kai, Lu Jianguang, Chen Jinshui. Nonlinear model predictive control based on support vector machine and genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015,23(12):2048-2052.
- [13] 李婷,王波. DNA 中一类非线性动力学方程的数值解[J].应用数学进展,2015,4(3):277-284.
- [14] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory [M]. Germany, Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- [15] 张峰,薛惠锋, WANG Wei, 等.一种模态一支持向量机水资源监测异常数据重构方法[J].农业机械学报,2017(11):1-13.

[参 考 文 献]

- [1] 王鹏飞,程琳琳,蒋舒,等.基于 PSR 的北京市耕地资源利用系统健康评价[J].湖北农业科学,2015,54(3):582-586.
- [2] 赵青,于水潇,夏书培,等.环京津地区耕地资源利用系统健康评价研究[J].土壤通报,2017,48(2):285-291.
- [3] 林航.基于 GIS 与物元模型技术的区域耕地资源利用系统健康评价[D].福州:福建农林大学,2015.
- [4] 谢俊奇.土地利用系统可持续性研究:指标、评价和规划[D].北京:中国农业大学,1999.
- [5] 蔡为民,唐华俊,陈佑启,等.土地利用系统健康评价的框架与指标选择[J].中国人口·资源与环境,2004,14(1):33-37.
- [6] 姚岚,吴次芳,吕添贵,等.基于三角模型的喀斯特地区土地利用系统健康评价[J].农业工程学报,2015,31(14):246-254.
- [7] 张锐,郑华伟,刘友兆.基于压力—状态—响应模型与集对分析的土地利用系统健康评价[J].水土保持通报,2014,34(5):146-152.
- [8] 郑华伟,张锐,杨兴典,等.基于 PSR 模型的土地利用系统健康评价及障碍因子诊断[J].长江流域资源与环境,2012,21(9):1099-1105.
- [9] 郭杰,吴斌.土地利用系统健康评价[J].中国土地科学,2011,25(4):71-77,96.
- [10] 苏学平.基于 DPSIR-TOPSIS 模型的恩施州土地利用系统健康评价研究[D].武汉:华中师范大学,2017.
- [11] 刘宝涛,王冬艳,刘惠清.基于 DPSIR 模型与 TOPSIS 算法的吉林省土地利用系统健康诊断[J].吉林农业大学学报,2017,39(1):74-81.
- [12] 陈美球,刘桃菊.土地健康与土地资源可持续利用[J].中国人口·资源与环境,2003,13(4):67-70.
- [13] 陈美球,赵小敏.土地健康与土地保护[J].中国土地科学,1998,12(4):19-21,33.
- [14] 胡晓雪,杨晓华,郦建强,等.河流健康系统评价的集对分析模型[J].系统工程理论与实践,2008(5):17-170,174.
- [15] 洪惠坤,廖和平,魏朝富,等.基于改进 TIPSIS 方法的三峡库区生态敏感区土地利用系统健康评价[J].生态学报,2015,35(24):8016-8027.
- [16] 王玉芳.长株潭地区土地利用系统健康评价研究[D].长沙:湖南师范大学,2006.
- [17] 周景斌,张英杰,何宾线.松木防腐材在园林木结构建筑和小品上的应用[J].北方园艺,2015(10):93-98.
- [18] 张锐,郑华伟,刘友兆.基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J].生态学报,2013,33(16):5090-5100.
- [19] 刘亚男,李淑杰,黄烁秋.基于 PSR 和改进熵值法的县域耕地生态安全评价研究[J].江西农业学报,2017,29(8):114-118.
- [20] 罗文斌.中国土地整理项目绩效评价、影响因素及其改善策略研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [21] 洪惠坤,廖和平,魏朝富,等.基于改进 TOPSIS 方法的三峡库区生态敏感区土地利用系统健康评价[J].生态学报,2015,35(24):8016-8027.
- [22] 肖风劲,欧阳华.生态系统健康及其评价指标和方法[J].自然资源学报,2002,17(2):203-209.
- [23] 蔡燕,王会肖.生态系统健康及其评价研究进展[J].中国生态农业学报,2007,15(2):184-188.
- [24] 余亮亮,蔡银莺.基于农户满意度的耕地保护经济补偿政策绩效评价及障碍因子诊断[J].自然资源学报,2015,30(7):1092-1103.
- [25] 李春燕,南灵.陕西省土地生态安全动态评价及障碍因子诊断[J].中国土地科学,2015,29(4):72-81.
- [16] Lin Chunfu, Wang Shengde. Fuzzy support vector machines[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002,13(2):464-471.
- [17] Chiang J H, Hao Peiyi. A new kernel-based fuzzy clustering approach: Support vector clustering with cell growing[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2003,11(4):518-527.
- [18] Yi Lin. Support vector machines and the bayes rule in classification[J]. Data mining and Knowledge Discovery, 2002,6(3):259-275.
- [19] Huang Hanping, Liu Yihung. Fuzzy support vector machines for pattern recognition and data mining[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2002,4(3):826-835.
- [20] 许翠云,业宁.基于类向心度的模糊支持向量机[J].计算机工程与科学,2014,36(8):1623-1628.
- [21] 鞠哲,曹隽喆,顾宏.用于不平衡数据分类的模糊支持向量机算法[J].大连理工大学学报,2016,56(5):525-531.
- [22] 李飞,黄瑾辉,李雪,等.基于随机模糊理论的土壤重金属潜在生态风险评价及溯源分析[J].环境科学学报,2015,35(4):1233-1240.
- [23] 张礼兵,程吉林,金菊良,等.农业灌溉水质评价的投影寻踪模型[J].农业工程学报,2006,22(4):15-18.

(上接第 146 页)