

基于随机森林回归算法的水生态文明综合评价

崔东文,金 波

(云南省文山州水务局,云南 文山 663000)

摘要:参考国内已有研究成果,利用层次分析法从水生态系统和经济社会系统中遴选出 24 个指标,构建 3 个层次的水生态文明评价指标体系和 5 个等级的分级标准;采用随机生成和随机选取的方法在水生态文明评价等级标准阈值间构造训练样本和检验样本,建立基于随机森林回归算法的水生态文明评价模型,并构建径向基神经网络模型作为对比模型,利用平均相对误差绝对值等 3 个指标对模型性能进行评价。以文山州为实例进行水生态文明综合评价分析,结果表明:基于随机森林回归算法的水生态文明评价模型 3 个评价指标均优于径向基神经网络模型,具有评价精度高、泛化能力强、收敛速度快、稳健性能好以及调节参数少等优点;文山州 2015 年、2020 年和 2030 年水生态文明评价结果分别为“基本和谐”、“和谐”和“理想状态”。

关键词:水生态文明;随机森林回归算法;径向基神经网络;层次分析法;评价模型;文山州

中图分类号:TV213;X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)05-0056-05

Comprehensive evaluation of water ecological civilization based on random forests regression algorithm//CUI Dongwen, JIN Bo(Wenshan Water Conservancy Bureau of Yunnan Province, Wenshan 663000, China)

Abstract: The aim of this study is to use the analytic hierarchy process to select 24 indicators from the water ecosystem and socioeconomic system. For archive this goal, 3 levels of water evaluation index system of water ecological civilization and 5 grades of grading standard have been constructed. We assessed the performance of the model through random generation and random selection by constructing the training samples and checking samples between the threshold evaluation standard of water ecological civilization; establishing the evaluation model of water ecological civilization based on random forest regression algorithm; and by constructing radial basis function neural network model as a contrast model. Taking Wenshan Prefecture as an example of comprehensive evaluation of water ecological civilization analysis, the results show that the three evaluation indexes of the water ecological civilization, based on random forest algorithm, are better than that on the radial basis function neural network model. The former has the advantages of high precision, strong generalization ability, fast convergence speed, steady performance and small number of regulation parameters. The overall prediction for 2015, 2020 and 2030 shows that the evaluation results of the eco-civilization of water in Wenshan Prefecture are “basically harmonious” “harmonious” and “ideal”, respectively.

Key words: water ecological civilization; random forest regression algorithm; RBF neural network; AHP; evaluation model; Wenshan Prefecture

水生态文明是生态文明建设的重要组成部分和基础保障,开展水生态文明评价对于促进人水和谐、推动水生态文明建设具有重要意义。由于水生态文明评价涉及水生态和经济社会两个复杂巨系统,具有多指标、高维和非线性等特征,适宜借助机器学习机如 BP 神经网络^[1]、极限学习机^[2]及支持向量机^[3,4]、随机森林回归(random forest regression, RFR)^[5]等智能方法进行评价。在这些智能算法中,随机森林回归算法具有调节参数少、预测精度高和泛化能力好等优点,可有效避免“过拟合”现象的发生,适合

各种数据集的运算,对数据集特征的提取具有较好的鲁棒性,适用于超高维特征向量空间,在医学^[6-7]、管理学^[8]和经济学^[9]等众多领域得到了广泛应用。

本文参考文献[10],利用层次分析法构建了包含目标层、准则层和指标层 3 级的水生态文明评价指标体系以及“理想状态”、“和谐”、“基本和谐”、“不和谐”和“极不和谐”等 5 个等级的分级标准;提出基于随机森林回归算法原理的水生态文明评价模型,并构建具有良好性能的径向基神经网络(radial basis function neural network, RBF)模型作为对比模

型,以文山州 2015 年、2020 年和 2030 年水生态文明评价为例进行实例验证,为即将全面开展的水生态文明建设提供借鉴和参考。

1 随机森林回归算法

随机森林回归算法是由 Breiman^[11]提出的基于决策树分类器的融合算法,其基本思想是基于统计学理论,利用 bootstrap 重抽样方法从原始样本中抽取多个样本,对每个 bootstrap 样本构建决策树,然后将所有决策树预测平均值作为最终预测结果。随机森林回归可以看成是由很多弱预测器(决策树)集成的强预测器。

设从独立同分布的随机向量 $(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 中抽取训练集,输入向量为 $\mathbf{X}$,输出向量为 $\mathbf{Y}$,则预测输出 $h(\mathbf{X})$ 的均方泛化误差为^[12]

$$E_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}}[\mathbf{Y} - h(\mathbf{X})]^2 \quad (1)$$

随机森林回归的预测输出是通过对 k 棵决策树 $\{h(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{X}_k)\}$ 取平均值得到的,其具有如下定理:

定理 1 当 $k \rightarrow \infty$,

$$E_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}}[\mathbf{Y} - \bar{h}_k(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}_k)]^2 \rightarrow E_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}}[\mathbf{Y} - E_{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}_k)]^2 \quad (2)$$

记式(2)的右边为 PE^{**} ,也就是随机森林的泛化误差。每棵决策树的平均泛化误差 PE^* 可定义为

$$PE^* = E_{\boldsymbol{\theta}} E_{\mathbf{X}, \mathbf{Y}}[\mathbf{Y} - h(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})]^2 \quad (3)$$

定理 2 对于所有的 $\boldsymbol{\theta}$ 有:

$$PE^{**} \leq \bar{\rho} PE^* \quad (4)$$

式中 $\bar{\rho}$ 为残差 $\mathbf{Y} - h(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta})$ 和 $\mathbf{Y} - h(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}')$ 的加权相关系数,且 $\boldsymbol{\theta}$ 与 $\boldsymbol{\theta}'$ 相互独立。

定理 2 给出了获得精确回归森林的条件:残差间的低相关性和低的错误决策树。随机森林回归算法通过加权相关系数 $\bar{\rho}$ 降低决策树的平均误差。

随机森林回归算法步骤可归纳如下^[12-13]:

设 $\boldsymbol{\theta}$ 为随机参数向量,对应的决策树为 $T(\boldsymbol{\theta})$ 。记 B 为 $\mathbf{X}$ 的域,也就是 $\mathbf{X}; \Omega \mapsto B \subseteq \mathbf{R}^p$,其中 $p \in \mathbf{N}$ 是自变量的维度。决策树的每一个叶节点都对应一个 B 的矩形空间,记每一个叶节点的矩形空间为 $\mathbf{R}_l \subseteq B$ ($l=1, 2, \dots, L$)。对于每一个 $\mathbf{x} \in B$,当且仅当一个叶节点 l 满足 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}_l$,记决策树 $T(\boldsymbol{\theta})$ 的叶节点为 $l(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ 。

步骤 1:利用 bootstrap 方法重采样,随机产生 k 个训练集 $\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \dots, \boldsymbol{\theta}_k$;利用每个训练集生成对应的决策树 $\{T(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_1)\}, \{T(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_2)\}, \dots, \{T(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_k)\}$ 。

步骤 2:假设特征有 M 维,从 M 维特征中随机抽取 m 个特征作为当前节点的分裂特征集,并以这 m 个特征中最好的分裂方式对该节点进行分裂(一般而言,在整个森林的生长过程中, m 的值维持不变)。

步骤 3:每个决策树都得到最大限度的生长,而

不进行剪枝。

步骤 4:对于新的数据,单棵决策树 $T(\boldsymbol{\theta})$ 的预测可以通过叶节点 $l(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ 的观测值取平均获得。假如一个观测值 X_i 属于叶节点 $l(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ 且不为 0,令权重 $\omega_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ 为

$$\omega_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \frac{1 \{X_i \in \mathbf{R}_l(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})\}}{\#\{j: X_j \in \mathbf{R}_l(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})\}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中权重之和等于 1。

步骤 5:单棵决策树的预测通过因变量的观测值 Y_i ($i=1, 2, \dots, n$)的加权平均得到。单棵决策树的预测值可由下式得到:

$$\hat{\mu}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \omega_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) Y_i \quad (6)$$

步骤 6:利用式(7)通过对决策树权重 $\omega_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_i)$ ($t=1, 2, \dots, k$)取平均得到每个观测值 $Y_i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 的权重 $\omega_i(\mathbf{x})$:

$$\omega_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \omega_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_i) Y \quad (7)$$

则随机森林回归的预测值可记为

$$\hat{\mu}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \omega_i(\mathbf{x}) Y_i \quad (8)$$

2 水生态文明内涵及评价指标体系

2.1 水生态文明内涵

水生态文明是生态文明概念的延伸。党的十七大把“建设生态文明”列为全面建设小康社会目标之一,首次把生态文明概念写入党代会的报告中;党的十八大再次把生态文明与政治、经济、文化、社会 4 种文明的建设并列,将生态文明作为社会整体文明不可分割的一部分,把生态文明建设提升到了战略的高度。为了贯彻落实党的十八大精神,水利部提出将生态文明理念融入水资源开发、利用、治理、配置、节约和保护等各方面,提出水生态文明的概念。水生态文明是人类在开发利用水资源、保障经济社会可持续发展、有效保护水生态系统的同时,实现人水和谐所创造的物质和精神财富的总和^[14-15]。狭义上的水生态文明忽视了经济社会发展对水生态系统产生的直接或间接的影响,仅仅把水生态文明理解为“保护水生态”,这显然是不全面的。水生态文明的核心是“和谐”,包括人与自然、人与人、人与社会等方方面面的和谐。因此,水生态文明可以这样理解:人类遵行人水和谐理念,以实现水资源可持续利用、支撑经济社会和谐发展、保障水生态系统良性循环的人水和谐的一种文化形态。

最严格水资源管理制度是我国水管理史上的一

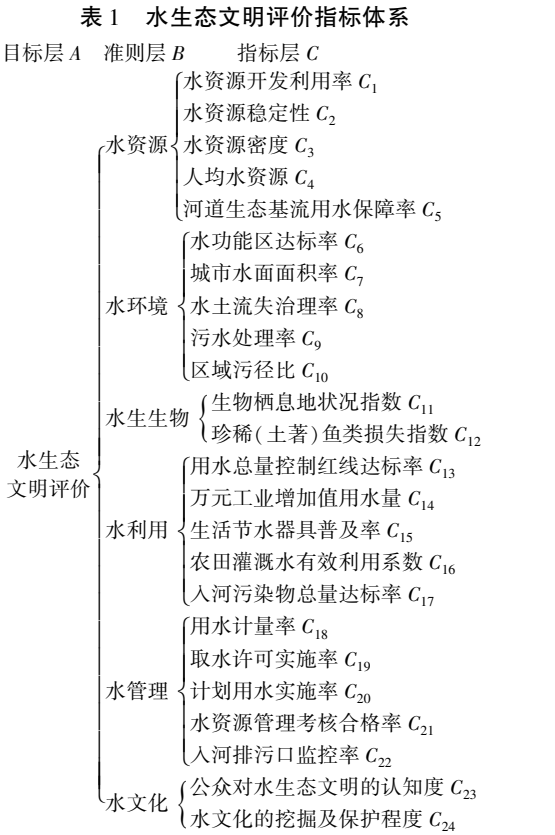
次重大突破,是针对我国当前水资源过度开发、粗放利用、污染严重三方面的突出问题而提出的,体现了水资源过度开发、效率低下、水污染三大问题;涵盖了水资源开发利用过程的取、用、排三大基本环节,明确了水资源管理的配置、节约、保护三大中心工作和任务要求。最严格水资源管理制度的实施将对我国一定时期内的水资源管理产生广泛而深远的影响,因而,包括水生态综合评价在内的相关评价研究均不能回避或忽略其存在。因此,本文基于最严格水资源管理制度与水生态基本内涵,提出水生态文明评价指标体系和分级标准。

2.2 评价指标体系

我国对于水生态文明建设与评价正处于试点和探索阶段,尚不具备制定统一、全面和成熟的水生态文明评价指标体系的条件,加之水生态文明是一个相对概念,具有一定的主观色彩,在不同时期、不同区域有着不同的理解和评判标准。本文在文献[10]基础上,基于最严格水资源管理制度与水生态基本内涵,并结合区域实际,遵循科学性、系统性、层次性、独立性和指标定量性与可操作性的指标选取原则,利用层次分析法从水资源、水环境、水生生物、水利用、水管理和水文化等6个方面遴选出24个具有代表性的指标构成水生态文明评价指标体系,将水生态文明评价分为目标层、准则层和指标层3个层次,见表1(表中公众对水生态文明的认知度和水文化的挖掘及保护程度两个定性指标采用调查问卷的形式收集、统计有效问卷,并根据公众类型和公众总体评价赋分得到)。

2.3 评价指标分级标准

按照上述所构建的水生态文明评价指标体系,



参考相关文献^[1,10],构建水生态文明评价指标分级标准,并将水生态文明评价分为5级(理想状态)、4级(和谐)、3级(基本和谐)、2级(不和谐)和1级(极不和谐)共5个等级,如表2所示。

3 评价实例

3.1 评价区概况

文山州位于云南省东南部,属亚热带低纬度高原季风气候区,全州总面积31456 km²,辖文山、砚山、西畴、麻栗坡、马关、丘北、广南、富宁等7县1

表2 水生态文明评价指标分级标准

评价等级	$C_1/\%$	C_2	$C_3/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	C_4/m^3	$C_5/\%$	$C_6/\%$	$C_7/\%$	$C_8/\%$
5级	<20	≥ 0.95	≥ 80	≥ 5000	≥ 95	≥ 95	≥ 20	≥ 90
4级	[20,40)	[0.90,0.95)	[60,80)	[4000,5000)	[80,95)	[80,95)	[15,20)	[75,90)
3级	[40,60)	[0.85,0.90)	[40,60)	[3000,4000)	[60,80)	[60,80)	[10,15)	[60,75)
2级	[60,80)	[0.80,0.85)	[20,40)	[2000,3000)	[40,60)	[40,60)	[5,10)	[30,60)
1级	≥ 80	<0.8	<20	<2000	<40	<40	<5	<30
评价等级	$C_9/\%$	$C_{10}/\%$	$C_{11}/\%$	C_{12}	$C_{13}/\%$	C_{14}/m^3	$C_{15}/\%$	C_{16}
5级	≥ 90	<2	≥ 80	<10	≥ 90	<20	≥ 90	≥ 0.7
4级	[80,90)	[2,4)	[60,80)	[10,20)	[80,90)	[20,40)	[80,90)	[0.6,0.7)
3级	[70,80)	[4,6)	[40,60)	[20,40)	[70,80)	[40,60)	[70,80)	[0.5,0.6)
2级	[50,70)	[6,10)	[20,40)	[40,60)	[50,70)	[60,80)	[50,70)	[0.4,0.5)
1级	<50	≥ 10	<20	≥ 60	<50	≥ 80	<50	<0.4
评价等级	$C_{17}/\%$	$C_{18}/\%$	$C_{19}/\%$	$C_{20}/\%$	$C_{21}/\%$	$C_{22}/\%$	$C_{23}/\%$	$C_{24}/\%$
5级	≥ 95	≥ 80	≥ 90	≥ 90	≥ 95	≥ 90	≥ 80	≥ 90
4级	[80,95)	[60,80)	[80,90)	[80,90)	[85,95)	[80,90)	[60,80)	[80,90)
3级	[60,80)	[40,60)	[70,80)	[70,80)	[70,85)	[70,80)	[40,60)	[60,80)
2级	[40,60)	[20,40)	[40,70)	[40,70)	[40,70)	[50,70)	[20,40)	[30,60)
1级	<40	<20	<40	<40	<40	<50	<20	<30

市。境内河流分属珠江流域和红河流域,多年平均径流深 501 mm,水资源总量 157.7 亿 m³。文山州水资源总量虽然丰富,但面临着水土资源不匹配、降水时空分布不均、开发利用率低、开发难度大、水质污染逐年加剧以及水资源利用效率低、水资源配置能力不足等问题。“十二五”以来,文山州经济社会得到迅猛发展,水资源供需矛盾日益突出,水污染日趋

严峻,导致水生态系统结构、社会服务功能等随之发生变化,随着国家生态文明建设概念的提出和文山州生态文明建设试点工作的开展,科学合理地评价水生态文明对于文山州生态文明建设和规划具有重要意义。文山州 2015 年、2020 年和 2030 年水生态文明评价指标规划数据详见表 3。

表 3 文山州水生态文明评价指标规划数据

水平年	$C_1/\%$	C_2	$C_3/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	C_4/m^3	$C_5/\%$	$C_6/\%$	$C_7/\%$	$C_8/\%$	$C_9/\%$	$C_{10}/\%$	$C_{11}/\%$	C_{12}
2015 年	7.0	0.964	51	4781	80	75	5	50	60	4.5	80	30
2020 年	8.1	0.946	49	4275	90	80	8	75	80	4.8	85	35
2030 年	8.5	0.913	47	4068	100	95	10	85	95	5.5	90	40
水平年	$C_{13}/\%$	C_{14}/m^3	$C_{15}/\%$	C_{16}	$C_{17}/\%$	$C_{18}/\%$	$C_{19}/\%$	$C_{20}/\%$	$C_{21}/\%$	$C_{22}/\%$	$C_{23}/\%$	$C_{24}/\%$
2015 年	100	60	80	0.52	80	70	60	50	85	70	40	50
2020 年	100	42	95	0.60	90	80	80	80	90	80	70	80
2030 年	100	30	100	0.70	95	90	95	95	95	95	90	95

注: C_1 、 $C_{13} \sim C_{22}$ 数据来源于《文山州“三条红线”分阶段控制指标分解方案》; $C_{23} \sim C_{24}$ 属于定性指标,依据不同规划水平年各指标实现程度给予量化;其他指标来源于《文山州水资源综合规划》等。

3.2 水生态文明评价

基于构建的水生态文明评价指标体系和分级标准,将随机森林回归算法模型(以下简称 RFR 模型)应用于文山州 2015 年、2020 年和 2030 年水生态文明评价,具体评价步骤为:

a. 训练及检验样本的生成。基于表 2,采用随机生成的方法在各评价等级阈值间生成 100 组样本,共随机内插得到 500 组样本,其中 250 组作为训练样本,250 组作为检验样本。样本及输出模式见表 4。

表 4 水生态文明评价样本及期望输出设计

样本组	目标输出	评价等级
1 ~ 100	1	1 级
101 ~ 200	2	2 级
201 ~ 300	3	3 级
301 ~ 400	4	4 级
401 ~ 500	5	5 级

b. 数据的归一化处理。为了消除表 2 中各评价指标不同量纲对评价结果的影响,需对评价指标数据按以下公式进行归一化处理:

$$\hat{x} = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \tag{9}$$

式中: $\hat{x}$ 为经归一化处理的数据; x 为原始数据;为了使各评价指标具有相同的权重,这里取 $x_{\max}$ 为各评价指标上限阈值的 2 倍; $x_{\min}$ 为各评价指标下限阈值的 0.1 倍。由于水资源稳定性 C_2 、水资源密度 C_3 等指标值越大,水生态文明评价越理想;而水资源开发利用 C_1 等指标值越小,水生态文明评价越理想,因此,对于指标值越大水生态文明评价越理想类指标直接按式(9)进行归一化处理,对于指标值越小水生态文明评价越理想类指标,对其取倒数后乘

100,再按式(9)进行处理。经过标准化处理后,数据处于 0 ~ 1 范围之内,有利于网络训练。

c. RFR 模型的构建。基于随机森林回归算法原理及实现步骤,利用 Matlab 软件和随机森林工具箱(randomforest-matlab)构建 RFR 模型,选取表 2 中 $C_1 \sim C_{24}$ 随机生成样本和随机选取样本作为模型输入向量,表 4 中评价等级目标输出作为输出向量,创建 24 输入 1 输出的随机森林回归水生态文明评价模型。并利用 Matlab 软件构建 RBF 对比评价模型。

d. RFR 模型的训练及精度检验。利用随机选取的训练样本和检验样本对 RFR 与 RBF 模型进行训练及检验,选取平均相对误差绝对值、最大相对误差绝对值和运行时间作为模型性能评价指标,并让各模型随机连续运行 50 次,取各性能评价指标平均值(运行时间为 50 次运行时间总和)作为最终评价指标值。经反复调试,RFR 与 RBF 模型要达到较好的评价效果,参数设置如下:①RFR 模型参数。由随机森林回归法定理 2 可知,加权相关系数 ρ 是影响 RFR 模型预测精度的关键因子,而实际应用中,在输入向量确定的条件下,随机森林中决策树棵数及分裂特征集中的特征个数 m 对随机森林回归算法预测精度及泛化能力有较大影响。本文设定决策树棵数为 1000,分裂特征集中的特征个数 m 选用默认值 $\sqrt{M}$ (M 为输入特征的总维数)。②RBF 模型参数。编写循环训练算法程序,最终确定 RBF 在径向基函数分布密度和期望误差分别为 2 和 0.0001 时模型性能达到最优。由于 RFR 与 RBF 模型中的训练与检验样本是随机生成的,因此各模型连续每次运行结果均不一样。将各模型随机连续运行 50 次,取各

性能评价指标的平均值作为最终评价指标值,并利用平均相对误差绝对值和最大相对误差绝对值检验结果来评价各模型的稳健性能等,检验结果见表5。

表5 RFR 与 RBF 模型性能评价指标

模型	平均相对误差 绝对值/%		最大相对误差 绝对值/%		运行时间/s	
	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	累积时间
RFR	0.58	0.45~0.76	6.89	3.80~9.80	0.12	5.86
RBF	2.85	2.52~3.29	16.87	12.32~21.55	0.50	24.82

e. 检验结果分析。由表5可知:①在随机生成、随机选取样本以及随机连续50次运行的条件下,RFR模型检验样本的3个指标均优于RBF模型,表明RFR模型具有较好的评价精度、泛化能力以及收敛速度,将其用于水生态文明评价是合理可行的;②RFR模型随机模拟变化过程非常平稳,表明RFR模型具有较好的稳健性能。

f. 评价结果及分析。将表3中的数据进行归一化处理,利用训练及检验好的RFR模型进行模拟及评价。将表2中水生态文明评价分级阈值进行模拟计算,结果见表6,将该模拟结果作为划分水生态文明评价等级的依据,某次随机连续50次文山州水生态文明评价结果见表7。

表6 RFR 模型水生态文明评价分级阈值模拟结果

水生态文明等级	模拟结果	水生态文明等级	模拟结果
5级	>4.0950	2级	(1.4449,2.4101]
4级	(3.3823,4.0950]	1级	<1.4449
3级	(2.4101,3.3823]		

表7 基于 RFR 模型的文山州水生态文明评价结果

水平年	输出值	评价等级
2015 年	3.0367	3 级
2020 年	3.7134	4 级
2030 年	4.2280	5 级

由表7可见,RFR模型对文山州2015年、2020年和2030年水生态文明评价结果分别为3级(基本和谐)、4级(和谐)和5级(理想状态),基本反映了文山州不同规划水平年水生态文明所处的状态,可为制定文山州水生态文明发展规划提供参考和借鉴。从评价输出结果来看,2015年与2020年文山州水生态文明评价分别为3级、4级,而2030年输出结果略大于5级临界值,表明随着2015—2030年文山州水生态文明建设工作不断推进,水生态文明建设将逐步由“基本和谐”趋于“理想状态”;到2030年规划水平年时,文山州的水生态文明建设整体上达到“理想状态”的目标要求,但在水环境、水生生物方面压力较大,还需加大水生态修复工作力度,改善水生生物生境,着力提升水生态文明建设整

体水平,确保2030年输出结果达到4.5以上,完全实现文山州水生态文明建设的终极目标。

4 结 语

我国目前的水生态文明建设和评价正处于试点和探索阶段,没有相对统一和完善的水生态文明评价指标体系和分级标准。本文参考国内已有研究成果,基于水生态文明概念及最严格水资源管理制度基本内涵,从水生态和经济社会两大系统中遴选出24个指标构建水生态文明评价的指标体系和分级标准;基于随机森林回归算法基本原理,提出随机森林回归水生态文明评价模型,并针对样本容量大小对模型性能具有关键性影响这一特性,采用随机内插和随机选取的方法生成数据样本对模型进行训练、检验及性能评价,在达到期望的评价精度和泛化能力后用于文山州不同规划水平年水生态文明的评价。评价结果基本反映了文山州不同规划水平年水生态文明所处的状态。当然,由于水生态文明评价指标体系和分级标准是评价中的关键所在,对评价结果有着重要影响,如何构建科学、合理的水生态文明评价指标体系和分级标准有待于在水生态文明建设过程中不断修改和完善。

参考文献:

[1] 崔东文. 基于改进BP神经网络模型的区域水资源脆弱性综合评价[J]. 长江科学院报, 2013, 30(2): 1-7. (CUI Dongwen. Comprehensive assessment of the water resources by improved BP neural network model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(2): 1-7. (in Chinese))

[2] 崔东文. 基于极限学习机的长江流域水资源开发利用综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(2): 14-19. (CUI Dongwen. Comprehensive evaluation of water resources development and utilization in Yangtze River Basin based on extreme learning machine [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(2): 14-19. (in Chinese))

[3] 崔东文. 支持向量机在湖库营养状态识别中的应用研究[J]. 水资源保护, 2013, 29(4): 26-30. (CUI Dongwen. Application of support vector machine to lake and reservoir trophic status recognition [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(4): 26-30. (in Chinese))

[4] 崔东文. 支持向量机在水资源类综合评价中的应用研究: 以全国31个省级行政区水资源合理性配置为例[J]. 水资源保护, 2013, 29(5): 20-27. (CUI Dongwen. Application of support vector machines to comprehensive assessment of water resources class [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(5): 20-27. (in Chinese))

(下转第79页)

- [6] 郑民生,马新红,李文长. 小浪底电站转轮裂纹原因及处理措施[J]. 水电能源科学,2008,26(5):153-155. (ZHENG Minsheng, MA Xinhong, LI Wenchang. Cause and treatment of at Xiaolangdi Hydropower Plant runner crack[J]. Water Resources and Power, 2008,26(5):153-155. (in Chinese))
- [7] 覃大青,刘光宁,陶星明. 混流式水轮机转轮叶片裂纹问题[J]. 大电机技术,2005(4):39-44. (QIN Daqing, LIU Guangning,TAO Xingming. The crack problem of the runner blade for francis turbine [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2005(4):39-44. (in Chinese))
- [8] 肖若富,韦彩新,韩风琴,等. 混流式水轮机转轮的流体力学研究[J]. 大电机技术,2001(7):41-43. (XIAO Ruofu, WIE Caixin, HAN Fengqin, et al. Study on dynamic analysis of the francis turbine runner[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2001(7):41-43. (in Chinese))
- [9] 付磊,黄彦华,朱培模. 水轮机转轮叶片流固耦合水力振动分析[J]. 水利水电科技进展,2010,30(1),24-26. (FU Lei, HUANG Yanhua, ZHU Peimo. Fluid-structure coupling hydraulic vibration of runner blades of hydraulic turbines [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010,30(1),24-26. (in Chinese))
- [10] 张洪渠,余波,陈柱. 小型混流式水轮机转轮优化设计及数值模拟[J]. 水力发电,2010,36(8):65-67. (ZHANG Hongqu, YU Bo, CHEN Zhu. Optimization design and numerical simulation of small francis turbine runner [J]. Water Power, 2010,36(8):65-67. (in Chinese))
- [11] 庞立军,吕桂萍,钟苏,等. 水轮机固定导叶的涡街模拟与振动分析[J]. 机械工程学报,2011,47(22):159-165. (PANG Lijun, LÜ Guiping, ZHONG Su, et al. Vortex shedding simulation and vibration analysis of stay vanes of hydraulic turbine [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(22):159-165. (in Chinese))
- [12] 钱忠东,李万. 泄水锥形式对混流式水轮机压力脉动的影响分析[J]. 水力发电学报. 2012,31(5):278-285. (QIAN Zhongdong, LI Wan. Analysis of pressure oscillation characteristics in Francis hydraulic turbine with different runner cones [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012,31(5):278-285. (in Chinese))

(收稿日期:2013-07-22 编辑:熊水斌)

(上接第 60 页)

- [5] 刘微,罗林开,王华珍. 基于随机森林的基金重仓股预测[J]. 福州大学学报:自然科学版,2008,36(增刊1):134-139. (LIU Wei, LUO Linkai, WANG Huazhen. A forecast of bulk-holding stock based on the random forest [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, ,2008,36(Sup1):134-139. (in Chinese))
- [6] 邹亮,黄琼,王明会,等. 基于随机森林和富集分析的阿尔茨海默症 GWA 研究[J]. 中国科学:生命科学,2012.42(8):639-647. (ZOU Liang, HUANG Qiong, WANG Minghui, et al. Research on Alzheimer's disease GWA random forest and enrichment analysis [J]. Scientia Sinica Vitae,2012.42(8):639-647. (in Chinese))
- [7] 李建更,高志坤. 随机森林:一种重要的肿瘤特征基因选择法[J]. 生物物理学报,2009,25(1):51-56. (LI Jiangeng, GAO Zhikun. Random forests: an important feature genes selection method of tumof [J]. Acta Biophysica Sinica,2009,25(1):51-56. (in Chinese))
- [8] 林成德,彭国兰. 随机森林在企业信用评估指标体系确定中的应用[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2007,46(2):199-203. (LIN Chengde, PENG Guolan. Application of random forests on selecting evaluation index system for enterprise credit assessment [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2007,46(2):199-203. (in Chinese))
- [9] 方匡南,朱建平,谢邦昌. 基于随机森林的基金超额收益方向预测与交易策略研究[J]. 经济经纬,2010(2):61-65. (FANG Kuangnan, ZHU Jianping, XIE Bangchang. A research into the forecasting of fund return rate direction and trading strategies based on the random forest method [J]. Economic Survey,2010(2):61-65. (in Chinese))
- [10] 唐克旺. 水生态文明的内涵及评价体系探讨[J]. 水资源保护,2013,29(4):1-4. (TANG Kewang. Discussion on concept and assessment system of aquatic ecological civilization[J]. Water Resources Protection,2013,29(4):1-4. (in Chinese))
- [11] BREIMAN L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001,45(1):5-32.
- [12] 方匡南. 随机森林组合预测理论及其在金融中的应用 [M]. 厦门:厦门大学出版社,2012.
- [13] 王小川,史峰,郁磊,等. MATLAB 神经网络 43 个案例分析 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2013.
- [14] 左其亭. 水生态文明建设的几个关键问题探讨[J]. 中国水利,2013(4):1-3. (ZUO Qiting. Discussions on key issues of water ecological civilization construction [J]. China Water Resources,2013(4):1-3. (in Chinese))
- [15] 马建华. 推进水生态文明建设的对策与思考[J]. 中国水利,2013(10):1-4. (MA Jianhua. Measures for implementing water ecological civilization[J]. China Water Resources,2013(10):1-4. (in Chinese))

(收稿日期:2013-07-28 编辑:熊水斌)