



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.017

宋晓娟, 李敏, 李昱. 基于模糊推理方法的莫莫格湿地面积预测[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 116-121. SONG Xiaojuan, LI Min, LI Yu. Momoge wetland area prediction based on fuzzy reasoning method[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 116-121. (in Chinese)

基于模糊推理方法的莫莫格湿地面积预测

宋晓娟, 李敏, 李昱

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 湿地面积不断萎缩导致自然湿地保护区生态功能持续减退, 因此预测湿地面积变化对保护自然湿地具有十分重要的意义。以中国吉林省莫莫格湿地为研究对象, 在分析影响湿地面积变化的主要因子基础上, 考虑因子对湿地面积影响程度的差异, 进行湿地面积预测。采用的预测方法为能较好地适应多因子预测问题的高度非线性特点的模糊推理方法, 同时采用常用的多元回归分析方法进行莫莫格湿地面积预测, 并将预测结果与模糊推理方法预测结果进行比较。研究结果表明: 模糊推理方法模拟预测得到湿地面积合格率和预测精度均高于多元回归分析方法。该方法可在工程领域的多指标非线性预测、评价、聚类等研究中尝试使用。

关键词: 湿地面积; 预测; 模糊推理; 多指标; 莫莫格

中图分类号: Q149; X37 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)02-0116-06

Momoge wetland area prediction based on fuzzy reasoning method

SONG Xiaojuan, LI Min, LI Yu

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The continuous shrinking of wetland area will lead to the continuous decline of the ecological functions of natural wetlands. In order to help wetlands to maintain a certain area, we should predict the natural area of wetlands first. In this paper, we used Momoge wetland in Jilin Province of China as the object of study to predict wetland area. First, we analyzed the main impact factors and their different influence on the area of Momoge wetland. We used the method of fuzzy reasoning method, which could well adapt to the highly nonlinear characteristics of multi factor prediction. The results showed that the prediction accuracy of the fuzzy reasoning method is better than that of the multiple regression analysis method. The fuzzy reasoning method can be used in the studies of multi index nonlinear prediction, evaluation, and classification in many engineering fields.

Key words: wetland area; prediction; fuzzy reasoning; multi index; Momoge

湿地是介于陆地和水域之间独特的生态系统, 在涵养水源、保持水土、减缓洪水、控制侵蚀、降解污染、调节气候和保护生物多样性等方面发挥着不可替代的重要作用^[1]。当前, 我国自然湿地整体上仍

然面临着各种威胁和巨大压力, 湿地面积不断萎缩, 生态功能持续减退, 湿地保护刻不容缓^[2-3]。因此通过预测湿地面积, 分析湿地生态需水量, 从而制定水库生态调度计划, 对保护湿地、防止湿地进一步退化

收稿日期: 2016-04-12 修回日期: 2016-05-28 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 水利部公益性行业专项经费项目(201401014); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DUT14QY11)

Funds: Special Funds of the Ministry of Public Welfare of the Ministry of Water Resources (201401014); The Fundamental Research Funds for the Central Universities Project (DUT14QY11)

作者简介: 宋晓娟(1990-), 女, 主要从事湿地生态修复及水库生态调度方面研究。E-mail: Song_148@163.com

通讯作者: 李敏(1975-), 女, 河北安国人, 副教授, 博士, 主要从事雨水、洪水资源利用, 可变模糊集理论与方法及其在水文水资源领域的应用。E-mail: minli7565@163.com

具有十分重要的意义。

关于湿地面积预测,国内外学者进行大量的研究并取得了一些成果。而预测湿地面积的方法大致可分为三类:第一类是根据历史的湿地面积资料自身系列进行的预测,如基于 CA-Markov 模型^[45]、灰色模型^[6]、支持向量机^[7]等方法进行湿地面积预测;第二类是单因子的预测方法,即通过建立湿地面积与单一代表性因子(如水位^[8]、年降水量^[9]等)之间的相关关系,进行湿地面积预测;第三类是多因子的预测方法,即在分析影响湿地面积变化的多种因子的基础上,基于 BP 神经网络^[10]、遗传算法^[11]等方法建立湿地面积与影响因子之间的关系,进行湿地面积预测研究。其中第三类方法因其能够清晰合理地描述湿地面积变化机理,成为多数研究人员的首选。而采用 BP 神经网络和遗传算法等方法进行多因子预测时,需要具备相对较长的资料序列,这使得资料短缺的实例研究难以采用该方法或预测结果的精度不理想。模糊推理方法是一种由具有模糊性的前提推导出结论的逻辑过程^[12],是基于模糊性知识(模糊规则)的一种近似推理^[13]。模糊推理方法对资料序列长度要求不高,较适用于因受资料不丰富而无法建立精确数学模型的复杂系统^[12]。模糊推理方法已在洪水灾害分析^[14]、水库汛限水位动态控制^[15]、水资源可再生能力评价^[16]等研究中成功应用。

位于中国吉林省的莫莫格自然保护区地处嫩江干流及其支流洮儿河的汇合处,且本区尚有二龙涛河和呼尔达河两条季节河,它们分别注入洮儿河与嫩江。近 10 年来,莫莫格保护区连续干旱,加之受上游水利工程影响,二龙涛河、呼尔达河已多年断流,洮儿河水量也大幅减少,湿地水资源紧缺,湿地面积不断萎缩,湿地生态系统严重退化^[17]。为了加强湿地修复和保护,维护湿地正常功能,需要准确预测莫莫格湿地面积,从而为进一步分析莫莫格湿地生态需水量,建立莫莫格湿地生态补水方案提供基础支持。

1 研究区域概况

莫莫格自然保护区位于中国东北松嫩平原的腹地,地理坐标为北纬 $45^{\circ}42'25''$ - $46^{\circ}18'0''$,东经 $123^{\circ}27'0''$ - $124^{\circ}43'37''$ 。该区隶属于吉林省镇赉县,东与黑龙江省的杜尔伯特、泰来、肇源县隔嫩江相望,南以洮儿河为界,与吉林省大安市相邻,西北和本县的丹岱、五棵树、哈吐气、东屏、黑鱼泡等乡镇的部分地域接壤,分为核心区、缓冲区、试验区三部分(见图 1)。莫莫格自然保护区是我国东部候鸟迁徙通道上

的重要停歇地,尤以白鹤、东方白鹤种群数量大、停歇时间长而闻名^[18],1997 年 12 月莫莫格自然保护区被国务院批准为国家级自然保护区^[19]。

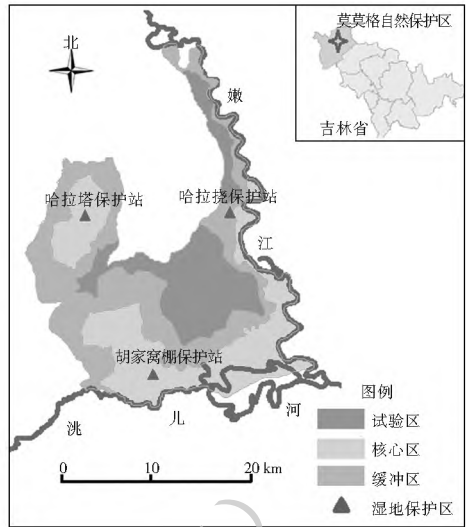


图 1 莫莫格自然保护区功能区划

Fig. 1 The function zoning of Momohe reserve

2 考虑影响因子权重的模糊推理方法

湿地面积变化受多个因子影响,且各因子之间的影响程度各不一样。目前大多湿地面积预测研究中,一般都没有考虑不同因子对湿地面积变化的影响差异,即分析时假定各因子对湿地面积的影响程度大小相同,因子权重为等权重。实际上,不同因子对湿地面积变化的影响存在差异,因此采取等权重方法会弱化重要因子的影响,强化非重要因子的影响,最终影响预测结果。本文拟在预测湿地面积过程中考虑影响因子权重,力求得到更加准确的预测结果。

多因子权重的确定方法可以分为三类:(1)客观赋权方法,它是一种定量分析的方法,以一定的推导公式为基础,通过输入各影响因子的数据信息,从而计算出各影响因子的权重系数;(2)主观赋权方法,它是一种定性分析的方法,完全是以决策者的个人经验和偏好为基础,人为确定各影响因子的权重系数;(3)主客观相结合的赋权方法,综合确定各影响因子的权重系数^[20]。

本文采用有序二元对比法计算就是属于主客观相结合的赋权方法,它能够有效地避免主观和客观赋权方法的弊端,使权重既能反映出各因子之间的数据信息,又能体现决策者的经验判断依据。

2.1 因子权重确定——有序二元对比法

有序二元对比法以陈守煜教授^[21]提出的模糊语气算子(表 1)为基础,通过人的主观判断计算得

出多个目标(指标、因子)之间的重要性比较,即有序二元比较矩阵:

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \dots & \beta_{1m} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \dots & \beta_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{m1} & \beta_{m2} & \dots & \beta_{mm} \end{bmatrix} = (\beta_{ij}) \quad (1)$$

式中: β_{ij} 为目标 i 对 j 关于重要性作二元比较时目

标 i 对 j 的重要性模糊标度值。

则目标集的权向量为

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1-\beta_{1i}}{\beta_{1i}}}, \frac{(1-\beta_{12})/\beta_{12}}{\sum_{i=1}^m \frac{1-\beta_{1i}}{\beta_{1i}}}, \dots, \frac{(1-\beta_{1m})/\beta_{1m}}{\sum_{i=1}^m \frac{1-\beta_{1i}}{\beta_{1i}}} \right) \quad (2)$$

式中: $\omega_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为第 i 个目标的权重值。

表 1 语气算子与模糊度标度关系

Tab. 1 Relationship between tone operator and fuzzy degree scale

模糊语气算子	同样	稍稍	略为	较为	明显	显著	十分	非常	极其	极端	无可比拟
模糊标度值	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00

2.2 考虑权重的模糊推理方法基本步骤

(1) 原始数据统计。统计历史 n 年湿地面积和影响因子数据资料,然后确定其中的最大值和最小值。

(2) 计算原始数据的相对隶属度。为了消除各影响因子对湿地面积的量纲影响,需要对所有 n 年湿地面积和影响因子进行规格化处理,即计算其相对隶属度。

(3) 建立模糊推理模式。确定影响因子与湿地面积之间的模糊关系,可以用公式(3)表示:

$$R = \bigcup_{i=1}^n \left(\left(\prod_{j=1}^m y_{ij} \right) \times \beta \right) \quad (3)$$

式中: $y_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 为影响因子的相对隶属度; β 为相应的湿地面积的相对隶属度。

(4) 检验预测。输入待预测湿地面积对应的影响因子的相对隶属度及权重,依据建立的模糊关系进行推理,建立如下加权相似关系:

$$SM = (1 + D(y_j^*, y_{ij}))^{-1} \quad (4)$$

$$D(y_j^*, y_{ij}) = \sqrt{\sum_{j=1}^m [\omega_j (y_j^* - y_{ij})]^2 / m} \quad (5)$$

式中: $y_j^* (j=1, 2, \dots, m)$ 为待预测湿地面积对应的影响因子的相对隶属度; $\omega_j (j=1, 2, \dots, m)$ 为第 j 个影响因子的权重值。

(5) 面积预测。依据模式选择的标准 τ , 根据 $SM > \tau$ 确定有效子模式,并对有效子模式输出的相对隶属度按照公式(6)进行简单的线性调整从而得到输出区间;最后将其转换为对应的待预测湿地面积的区间,最终组合多条有效子模式的输出后即可得到待预测的湿地面积 Y^* 。

$$\beta_i = \beta_i \pm \beta_i \times (1 - \tau) \quad (6)$$

式中: β_i 为有效子模式输出的相对隶属度。

3 结果与分析

3.1 影响因子的选择及权重确定

莫莫格湿地是水陆相互作用而形成的自然综合

体,水文状况是湿地面积变化的主要驱动力,对湿地发展起主要作用。因此,本文所选的莫莫格湿地面积就是保护区的水面面积,利用从美国地质勘探局(USGS)官网上下下载所属研究区域不同年份 10 月份的 Landsat 遥感图像,通过 ERDAS IMAGINE 9.2 软件,提取历年湿地面积。然后根据已有湿地面积影响因子研究成果分析^[22-23],针对莫莫格湿地所在地理位置及其所在流域水系特点,确定影响莫莫格湿地面积变化的主要因素为本区域年降雨量、洮儿河年来水量、嫩江年来水量。基于历史资料分析莫莫格湿地面积与洮儿河察尔森水文站不同流量(0 m³/s、10 m³/s、20 m³/s、30 m³/s、40 m³/s、50 m³/s、60 m³/s)对应的年来水量、嫩江江桥水文站不同流量(0 m³/s、100 m³/s、200 m³/s、300 m³/s、400 m³/s、500 m³/s、600 m³/s、700 m³/s、800 m³/s、900 m³/s、1 000 m³/s)对应的年来水量之间的相关关系,综合比较得出当洮儿河察尔森水文站以大于 40 m³/s 的年来水量、嫩江江桥水文站以大于 800 m³/s 的年来水量作为影响因子时,与湿地面积变化的相关性最大,即最终选取本区域年降水量、洮儿河察尔森水文站大于 40 m³/s 的年来水量、嫩江江桥水文站大于 800 m³/s 的年来水量作为影响莫莫格湿地面积变化的因子。莫莫格湿地面积与各影响因子数据见表 2,由 1999 年—2013 年 12 年的数据资料组成。

根据专家学者的经验,针对莫莫格湿地,降雨补给是主要补给来源,其次支流洮儿河距莫莫格湿地近,其补给相对干流嫩江补给更重要^[18];并且客观计算各影响因子与莫莫格湿地面积之间的相关关系,见表 3。得出各影响因子的重要性排序为:年降水量 > 洮儿河察尔森水文站年来水量 > 嫩江江桥水文站年来水量,并且认为年降雨量相对于洮儿河察尔森水文站年来水量稍稍重要,相对于嫩江江桥水

文站年来水量略微重要, 洮儿河察尔森水文站年来水量/亿 m³ 择有效子模式的最低标准^[20]。然后应用公式(6) 对

表 2 莫莫格湿地面积与各影响因子数据

Tab. 2 Data of Momoge wetland area and impact factors

序号	年份	湿地面积 / hm ²	年降雨量 / mm	洮儿河察尔森水文站年来水量/ 亿 m ³	嫩江江桥水文站年来水量/ 亿 m ³
1	1999	29 127	312.0	13.010	352.405
2	2000	15 702	224.1	3.404	65.254
3	2001	8 030	193.0	0.681	37.261
4	2002	17 849	311.2	0.000	17.200
5	2003	16 417	373.7	0.409	115.672
6	2004	7 821	187.3	0.409	154.051
7	2005	31 652	444.1	2.304	99.460
8	2006	22 357	340.7	3.315	85.618
9	2007	12 065	297.9	1.031	24.883
10	2009	14 638	405.9	0.050	60.018
11	2011	18 422	370.7	1.971	94.020
12	2013	26 216	430.2	9.354	245.737

表 3 各影子因子与湿地面积系列的相关关系

Tab. 3 The relationship between impact factors and wetland area series

影响因子	年降雨量	洮儿河察尔森水文站年来水量	嫩江江桥水文站年来水量
相关系数	0.702	0.665	0.554

水量相对于嫩江江桥水文站年来水量稍稍重要。从而得到有序二元比较矩阵:

$$\beta = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.55 & 0.6 \\ 0.45 & 0.5 & 0.55 \\ 0.4 & 0.45 & 0.5 \end{bmatrix}$$

则影响因子的权向量为

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3) = (0.403, 0.329, 0.268)$$

3.2 莫莫格湿地模糊推理模式建立

选择莫莫格湿地 2007 年前的 9 组数据资料用于建立推理模式, 2007 年后的 3 组数据资料用于检验预测。然后选用越大越优型相对隶属度公式计算莫莫格湿地面积和各因子的相对隶属度, 再以影响因子相对隶属度作为输入, 以相应的湿地面积相对隶属度作为输出, 建立模糊推理模式, 见表 4。

3.3 湿地面积检验预测

输入检验预测 3 年数据各因子的相对隶属度和权重, 应用公式(4) 和(5) 计算输入与各子模式之间的加权相似关系。依据模式推理经验和预测工作的实际情况, 借鉴其它模糊推理方法, 选取 0.85 作为选

表 4 模糊推理关系

Tab. 4 The fuzzy reasoning relationship

序号	年份	if Y_{i1} and Y_{i2} and Y_{i3} then β_i			
		Y_{i1}	Y_{i2}	Y_{i3}	β_i
1	1999	0.486	1.000	1.000	0.894
2	2000	0.144	0.262	0.143	0.331
3	2001	0.022	0.052	0.060	0.009
4	2002	0.482	0.000	0.000	0.421
5	2003	0.727	0.031	0.294	0.361
6	2004	0.000	0.031	0.408	0.000
7	2005	1.000	0.177	0.245	1.000
8	2006	0.598	0.255	0.204	0.670
9	2007	0.431	0.079	0.023	0.178

有效子模式输出的相对隶属度进行线性调整得到输出区间, 并将其转换成对应的待预测湿地面积区间。最后对各有效子模式的输出进行综合判决, 将待预测湿地面积区间的平均值作为待预测的湿地面积, 得到最后的推理预测结果, 见表 5。

表 5 检验预测结果分析

Tab. 5 The analysis of test prediction results

序号	年份	实测湿地面积 / hm ²	预测区间	预测区间中值 / hm ²	是否在预测区间内	相对误差 (%)
1	2009	14 638	[14520, 16883]	15 701	是	7.26
2	2011	18 422	[16345, 19353]	17 849	是	3.11
3	2013	26 216	[25932, 32323]	29 127	是	11.10

3.4 预测结果分析

从表 5 可以看出, 基于模糊推理方法对检验预测年份进行预测时, 实测湿地面积均在预测区间内, 合格率为 100%, 且预测区间平均值与实测值之间的相对误差分别为 7.26%、3.11%、11.10%, 预测精度高。

此外, 为分析模糊推理方法预测结果的精度高, 本文同时采用常用的多元回归分析方法进行莫莫格湿地面积预测, 并将预测结果与模糊推理方法进行比较(表 6)。由表 6 可知, 模糊推理方法得到的预测精度明显高于多元回归分析方法的预测精度, 说明模糊推理方法对于多因子、时间序列较短的预测问题研究效果更好, 对于解决具有高度非线性特点的预测问题更有效。所以可以通过模糊推理方法预测湿地面积, 从而进一步分析湿地生态需水量, 制定水库生态调度计划, 达到保护湿地、防止湿地进

一步退化的目的。

表 6 两种方法计算湿地面积对比

Tab. 6 Comparison between two methods in calculating wetland area

序号	年份	实测湿地面积	模糊推理方法		回归分析方法	
			预测湿地面积/hm ²	相对误差(%)	预测湿地面积/hm ²	相对误差(%)
1	2009	14 638	15 701	7.26	17 971	22.77
2	2011	18 422	17 849	3.14	18 497	5.02
3	2013	26 216	29 127	11.10	30 041	14.59

4 总结与讨论

湿地面积预测是计算湿地生态需水量、制定合理的生态补水方案的前提。本文在考虑影响因子权重的基础上,采用模糊推理方法对莫莫格湿地面积进行预测,并与多元回归分析方法进行对比,研究结果表明模糊推理方法的预测精度明显高于多元回归分析方法,采用模糊推理预测方法解决具有高度非线性特点的预测问题更有效。该方法可在工程领域的多指标非线性预测、评价、聚类等研究中尝试使用。

本文分析采用的湿地面积影响因子基本属自然因素。近年来,人类活动对湿地面积的影响越来越突出,因此有必要综合考虑自然和人为等多种因素的影响进行湿地面积预测,使研究情况更符合实际情况,亦会得到更加精准预测结果。

参考文献(References):

[1] 孙广友. 中国湿地科学的进展与展望[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 666-672. (SUN Guang you. Development and prospect of wetland science in China[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(6): 666-672. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-8166. 2000. 06. 008

[2] 白军红, 王庆改. 中国湿地生态威胁及其对策[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 247-249. (BAI Jun hong, WANG Qing gai. Environmental problems and countermeasures for wetlands in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(4): 247-249. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-3409. 2003. 04. 069

[3] 潘辉, 罗彩莲, 谭芳林. 3S 技术在湿地研究中的应用[J]. 湿地科学, 2006, 4(1): 75-80. (PAN Hui, LUO Cai Lian, TAN Fang Lin. Application of 3S technology to wetland researches [J]. Wetland Science, 2006, 4(1): 75-80. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-5948. 2006. 01. 012

[4] 凌成星, 鞠洪波, 张怀清, 等. 基于 CA-MARKOV 模型的北京湿地资源变化预测研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(20): 262-269. (LING Cheng xing, JU Hong bo, ZHANG Huaqing, et al. Study on the forecast of wetland resources changes in Beijing based on CA-MARKOV model[J]. Chinese Agricultural

Science Bulletin, 2012, 28(20): 262-269. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6850. 2012. 20. 048

[5] Luo G P, Amuti T, Zhu L, et al. Dynamics of landscape patterns in an inland river delta of Central Asia based on a cellular automata Markov model[J]. Regional Environmental Change, 2015, 15(2): 277-289. DOI: 10. 1007/s10113-014-0638-4

[6] 段浩, 潘世兵, 李琳. 基于灰色模型的敦煌西湖保护区湿地演化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 198-202. (DUAN Hao, PAN Shi bing, LI Lin. Wetland change forecast in Durrhuang Xihu Nature Reserve based on gray model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(1): 198-202. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2015. 035

[7] 吴学明, 张怀清, 林辉, 等. 基于支持向量机的北京市湿地变化预测研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(14): 280-284. (WU Xueming, ZHANG Huaqing, LIN Hui, et al. Wetland change forecast in Beijing based on support vector machines[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(14): 280-284. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6850. 2012. 14. 055

[8] 梁婕, 蔡青, 郭生练, 等. 基于 MODIS 的洞庭湖湿地面积对水文的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6628-6635. (LIANG Jie, CAI Qing, GUO Shenglian, et al. MODIS based analysis of wetland area responses to hydrological processes in the Dongting Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6628-6635. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/s tx b201110041448

[9] 徐玲玲, 张玉书, 陈鹏狮, 等. 近 20 年盘锦湿地变化特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(3): 483-490. (XU Lingling, ZHANG Yushu, CHEN Pengshi, et al. Analysis on the changing characteristics and influencing factors of Panjin Wetland during the past 20 years [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(3): 483-490. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-3037. 2009. 03. 013

[10] 赵亮, 刘吉平, 徐艳艳. 基于 BP 神经网络模型的三江平原湿地面积预测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(10): 53-56. (ZHAO Liang, LIU Jiping, XU Yanyan. Forecasting research of Sanjiang Plain wetland area based on the BP neural network model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(10): 53-56. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2012. 10. 005

[11] Ali A. Multi-Objective Operations of Multi-Wetland Ecosystem: iModel Applied to the Everglades restoration[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2015. DOI: 10. 1061/(ASCE)WR. 1943-5452. 0000511

[12] Zadeh L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision process[J]. Systems Man & Cybernetics IEEE Transactions on, 1973, smc 3(1): 28-44. DOI: 10. 1109/TSMC. 1973. 5408575

[13] 陈纳新. 模糊聚类和模糊推理在评价海冰灾害中的应用[D]. 大连: 大连海事大学, 2008. (CHEN Naxin. The Application of fuzzy clustering and fuzzy inference in the assessment of sea ice disaster[D]. Dalian: Dalian maritime university, 2008. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. y1257039

[14] 邹强, 周建中, 周超, 等. 基于可变模糊集理论的洪水灾害风险分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 126-132. (ZOU Qiang,

- ZHOU Jianzhong, ZHOU Chao, et al. Flood disaster risk analysis based on variable fuzzy sets theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 126-132. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.021
- [15] 周惠成, 朱永英, 王本德, 等. 水库汛限水位动态控制的模糊推理方法研究与应用[J]. 水力发电, 2007, 33(7): 9-12. (ZHOU Huicheng, ZHU Yongying, WANG Bende, et al. Research on the fuzzy inference dynamic control method for flood limited level[J]. Hydroelectric power, 2007, 33(7): 9-12. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2007.07.003
- [16] 陈守煜, 李敏. 基于可变模糊集理论的水资源可再生能力评价模型[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 431-435. (CHEN Shouyu, LI Min. Assessment model of water resources reproducible ability based on variable fuzzy set theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4): 431-435. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2006.04.008
- [17] 郭跃东, 何岩, 张明祥, 等. 洮儿河中下游流域湿地景观演变及驱动力分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 118-121. (GUO Yuedong, HE Yan, ZHANG Mingxiang, et al. Characteristics and driving forces of wetland changes in middle lower reaches of Taer River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(2): 118-121. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2004.02.030
- [18] 郎振华, 胥铭兴, 孙晓梅. 莫莫格湿地地表水环境现状与保护[J]. 东北水利水电, 2009, 27(11): 54-55, 67, 72. (LANG Zhenhua, XU Mingxing, SUN Xiaomei. Surface water environment status and conservation in Momogetan wetland[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2009, 27(11): 54-55, 67, 72. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1002-0624.2009.11.021
- [19] 王国平, 张玉霞, 高峰. 吉林省西部地区重要湿地及其生态环境功能[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 121-124. (WANG Guoping, ZHANG Yuxia, GAO Feng. Important wetlands of west Jilin and their ecological environment function[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(6): 121-124. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2001.06.032
- [20] 李敏. 基于可变模糊集理论的径流预报方法研究[D]. 大连: 大连理工大学. 2008. (LI Min. Study on runoff forecasting methods based on variable fuzzy set theory[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese) DOI: 10.7666/d.y1419337
- [21] 陈守煜. 可变模糊聚类及模式识别统一理论与模型[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(2): 307-312. (CHEN Shouyu. Unified theory and model of variable fuzzy clustering and pattern recognition[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(2): 307-312. (in Chinese) DOI: 10.7511/dlhx200902027
- [22] 杜际增, 王根绪, 杨燕, 等. 长江黄河源区湿地分布的时空变化及成因[J]. 生态学报, 2015, 35(18): 6173-6182. (DU Jizeng, WANG Genxu, YANG Yan, et al. Temporal and spatial variation of the distributive patterns and driving force analysis in the Yangtze River and Yellow River source regions wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(18): 6173-6182. (in Chinese) DOI: 10.5846/stxb201401260196
- [23] 魏强, 杨丽花, 刘永, 等. 三江平原湿地面积减少的驱动因素分析[J]. 湿地科学, 2014, 12(6): 766-771. (WEI Qiang, YANG Lihua, LIU Yong, et al. Driving factors of shrinkage of wetlands in the Sanjing Plain[J]. Wetland Science, 2014, 12(6): 766-771. (in Chinese) DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2014.06.013

《南水北调与水利科技》优先数字出版声明

为即时确认作者科研成果、彰显论文传播利用价值,从2011年起,将《南水北调与水利科技》印刷版期刊出版的定稿论文在“中国知网”(http://www.cnki.net)以数字出版方式提前出版(优先数字出版)。欢迎读者在中国知网“中国学术期刊网络出版总库”检索、引用本刊作者最新研究成果。

《南水北调与水利科技》编辑部