

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.010

基于联系数集对势置信区间估计的旱灾风险分析模型

周戎星^{1,2}, 金菊良^{1,2}, 崔毅^{1,2}, 周亮广^{1,2}, 周玉良^{1,2}, 白夏^{1,2}, 张宇亮^{1,2}

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009;
2. 合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所, 安徽合肥 230009)

摘要:针对现有集对势方法难以进一步挖掘联系数中不确定性变化信息问题,提出将三元联系数减法集对势看作一个服从正态分布的随机变量,采用95%置信水平下置信区间的长度来反映不确定性大小,建立了基于联系数集对势置信区间估计的旱灾风险分析模型。以宿州市为例对构建的模型进行了验证,评价结果与现有的减法集对势、半偏减法集对势方法相一致,说明基于联系数集对势置信区间估计的旱灾风险分析模型合理有效;该模型得到的评价结果不是一个数值,而是一置信概率区间,提供了关于评价结果可靠性方面的信息,能够反映在多种不确定因素综合影响下的旱灾风险实际情况,在水资源保护系统不确定性分析评价中具有应用前景。

关键词:旱灾风险;动态分析;集对势;联系数;置信区间;宿州市

中图分类号:X43 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0073-06

Drought risk analysis model based on confidence interval estimation of connection number set pair potential
ZHOU Rongxing^{1,2}, JIN Juliang^{1,2}, CUI Yi^{1,2}, ZHOU Lianguang^{1,2}, ZHOU Yuliang^{1,2}, BAI Xia^{1,2}, ZHANG Yuliang^{1,2}
(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To solve the problem that existing set pair potential methods hardly reflect the uncertainty of connection number, it was proposed to regard the subtraction set pair potential of ternary connection number as a random variable obeying a normal distribution, with the confidence interval at 95% confidence level used to reflect the uncertainty, and a drought risk analysis model based on confidence interval estimation of connection number set pair potential was established. Suzhou City was used as an example to verify the model, and the drought risk evaluation results of Suzhou City with the proposed model are consistent with those of subtraction set pair potential and semi-partial subtraction set pair potential methods, demonstrating that the drought risk analysis model based on the confidence interval estimation of connection number set pair potentials is reasonable and effective. The evaluation result obtained with this model is not a value, but a confidence probability interval, which provides more information on the reliability of the evaluation result, and can better reflect the actual situation of drought risk comprehensively affected by a variety of uncertainties. The proposed model in this study has application prospect in uncertainty analysis and evaluation problems of water resources protection systems.

Key words: drought risk; dynamic analysis; set pair potential; connection number; confidence interval; Suzhou City

集对分析是用于研究两个集合间确定性与不确定性关系的系统数学理论,已在众多领域得到广泛应用^[1-4]。联系数集对势的概念在联系数的基础上提出,用来反映联系数同一度 a 、差异度 b 和对立度 c 间的差别^[5],其实质是对联系数所表达的研究对象确定性整体发展趋势的描述。对于三元联系数,

赵克勤^[5]提出用 a/c 构造集对势,但存在未考虑差异度的影响、对立度不能等于0,且当对立度趋近于0时计算结果失真等问题。为此,周家红等^[6]考虑了差异度在极端取值条件下对集对势的影响,提出将所有差异度转化为对立度的悲观势和同一度的乐观势;为解决对立度不能等于0的问题,李德顺^[7]和

基金项目:国家自然科学基金(52109009);安徽省自然科学基金(2108085QE254);安徽省高校优秀青年人才支持计划(gxyq2020055);中央高校基本科研业务费专项(JZ2021HGTA0165)

作者简介:周戎星(1990—),女,博士研究生,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:zhoux11@163.com

通信作者:崔毅(1990—),男,讲师,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:cuiyi9007@163.com

潘争伟等^[8-9]借助指数函数改进传统集对势,分别提出了广义集对势和集对指数势;金菊良等^[10]和Chen等^[11-12]提出将差异度按差异度系数的比率取值法进行分配,分别构造了三元联系数的减法集对势和五元联系数的减法集对势,根据联系数值确定集对势序(集对势之间大小关系的次序);金菊良等^[13]又借鉴万有引力定律重新分配不确定项,提出了引力减法集对势,并根据偏联系数的思想,进一步构造了半偏减法集对势^[14-15]。分析发现,现有的研究在构造集对势时,或未考虑不确定项 bI (I 为差异度系数)对集对势的影响,或着力于如何合理地把差异度分配到同一度和对立度中,得到确定性的总体发展趋势,却忽略了联系数能同时反映研究对象确定性和不确定性的优点。为此,本文在已有联系数和集对势理论研究的基础上,提出将集对势看作一个服从正态分布的随机变量,根据差异度系数的变化特性和三元联系数的集对系统结构^[16],提出该随机变量概率分布的估计方法,进一步构建基于联系数集对势置信区间估计的旱灾风险分析模型,并以宿州市为研究区域进行实例验证。

1 模型构建

1.1 集对势概率分布参数的估计

三元联系数的一般表达式为

$$u = a + bI + cJ \quad (1)$$

其中 $a+b+c=1$ $a, b, c \in [0, 1]$ $I \in [-1, 1]$

式中 J 为对立度系数,一般取 $J = -1$ 。为计算该联系数对应的研究对象的相对确定状态和发展趋势,金菊良等^[10]提出根据比率取值法把不确定项按比例分配到确定的同一项和对立项中,得到减法集对势 $s_1(u)$:

$$s_1(u) = a - c + ba - bc = (a - c)(1 + b) \quad (2)$$

考虑减法集对势的不确定项 b^2I ,将 $s_1(u)$ 变化为

$$s_2(u) = (a - c)(1 + b) + b^2I \quad (3)$$

若基于乐观势^[6]将不确定项 b^2I 全部分配到同一项中,即取 $I = 1$,可得到 $s_2(u)$ 的最大值:

$$s_{2\max}(u) = (a - c)(1 + b) + b^2 \quad (4)$$

若基于悲观势^[6]将不确定项 b^2I 全部分配到对立项,即取 $I = -1$,可得到 $s_2(u)$ 的最小值:

$$s_{2\min}(u) = (a - c)(1 + b) - b^2 \quad (5)$$

根据中心极限定理^[17-18],如果一个事物受到多种因素的影响,无论各因素本身是什么分布,它们总和结果的平均值符合正态分布。联系数所描述研究对象的发展趋势通常受多种因素影响,而联系数集

对势正是描述研究对象发展趋势的随机变量,为此,本文将集对势看成是一个服从正态分布的随机变量 X 。若已知 X 的数学期望 x 和标准差 σ ,可得到该随机变量的概率分布。根据正态分布的“ 3σ 原则”,随机变量 X 落在区间 $(x - 3\sigma, x + 3\sigma)$ 外的概率小于0.3%,在实际问题中可视为基本不会发生,因此可以把 $(x - 3\sigma, x + 3\sigma)$ 看作是随机变量 X 实际可能的取值区间^[19]。因此可得:

$$x - 3\sigma = (a - c)(1 + b) - b^2 \quad (6)$$

$$x + 3\sigma = (a - c)(1 + b) + b^2 \quad (7)$$

联立式(6)(7)可得:

$$x = (a - c)(1 + b) \quad (8)$$

$$\sigma = b^2/3 \quad (9)$$

据此,可将三元联系数 u 的集对势视作服从从数学期望为 $(a - c)(1 + b)$ 、标准差为 $b^2/3$ 的正态分布的随机变量,可通过随机模拟估计一定置信水平下的置信区间。

1.2 旱灾动态风险分析模型构建

将该方法应用于旱灾风险的动态分析中,建立基于联系数集对势置信区间估计的旱灾风险动态分析模型,建模过程主要包括以下5个步骤:

a. 指标体系的建立和评价等级的划分。根据自然灾害风险系统理论,建立旱灾风险系统的子系统,根据指标选取的原则,结合文献调研、实际调研和专家意见,建立旱灾风险评价的指标体系 $X_j(j = 1, 2, \dots, n)$ 和对应的等级标准,相应的样本集记为 $\{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$,其中 m, n 分别为评价样本数和评价指标数。

b. 建立评价指标值 x_{ij} 和评价标准等级间的联系数 u_{ij} ^[20]:

$$u_{ij} = a_{ij} + b_{ij}I + c_{ij}J \quad (10)$$

式中 a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} 分别为联系数 u_{ij} 的同一度、差异度和对立度。 a_{ij} 越接近1,说明该指标值 x_{ij} 对应的旱灾风险越小; c_{ij} 越接近1,说明该指标值 x_{ij} 对应的旱灾风险越大。

c. 对 u_{ij} 加权可得评价样本 i 的联系数 u_i ^[20]:

$$u_i = a_i + b_iI + c_iJ = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij} + \sum_{j=1}^n w_j b_{ij}I + \sum_{j=1}^n w_j c_{ij}J \quad (11)$$

式中: a_i, b_i, c_i 分别为联系数 u_i 的同一度、差异度和对立度; w_j 为指标 j 的权重。类似的, a_i 越接近1,说明样本 i 对应的旱灾风险越小; c_i 越接近1,说明该样本 i 对应的旱灾风险越大。

d. 确定指标值 x_{ij} 和评价样本 i 联系数集对势的置信区间。本模型采用95%置信水平下的置信区间(以下称95%置信区间)作为评价结果。将样

表 1 宿州市 2007—2017 年旱灾风险评估样本本联系数集对势数学期望及 95% 置信区间

Table 1 Mathematical expectation and confidence interval at 95% confidence level for connection number set pair potential of drought risk assessment samples in Suzhou City from 2007 to 2017

年份	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	集对势数学期望	集对势置信区间	文献[20]评价等级
2007 年	0.288	0.363	0.349	-0.083	(-0.170, 0.001)	2.061
2008 年	0.236	0.385	0.379	-0.198	(-0.293, -0.101)	2.140
2009 年	0.216	0.399	0.385	-0.236	(-0.342, -0.135)	2.169
2010 年	0.190	0.388	0.422	-0.322	(-0.419, -0.226)	2.231
2011 年	0.225	0.392	0.383	-0.220	(-0.320, -0.118)	2.157
2012 年	0.232	0.393	0.375	-0.199	(-0.303, -0.100)	2.143
2013 年	0.258	0.395	0.347	-0.124	(-0.226, -0.026)	2.089
2014 年	0.239	0.408	0.353	-0.161	(-0.270, -0.054)	2.114
2015 年	0.241	0.407	0.352	-0.156	(-0.265, -0.049)	2.109
2016 年	0.289	0.401	0.310	-0.029	(-0.136, -0.078)	2.019
2017 年	0.287	0.404	0.309	-0.031	(-0.138, 0.077)	2.021

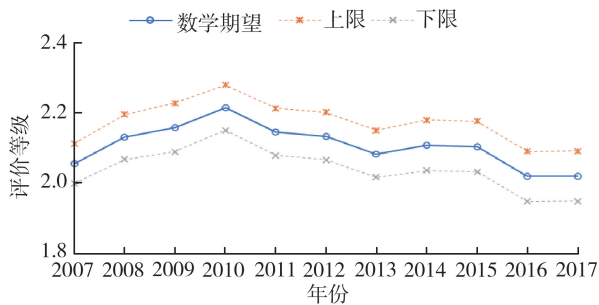


图 2 宿州市旱灾风险评价等级数学期望和 95% 置信区间
Fig.2 Mathematical expectation and confidence interval at 95% confidence level of drought risk evaluation grade in Suzhou City

为进一步分析导致宿州市旱灾风险变化的原因,对宿州市旱灾风险评价系统中 4 个子系统的评价结果和各指标联系数集对势的置信区间进行分析。各子系统旱灾风险评价等级的数学期望和 95% 置信区间如图 3 所示,图中实线表示各子系统旱灾风险评价等级的数学期望,相同颜色的虚线表示该子系统评价等级 95% 置信区间的边界值。

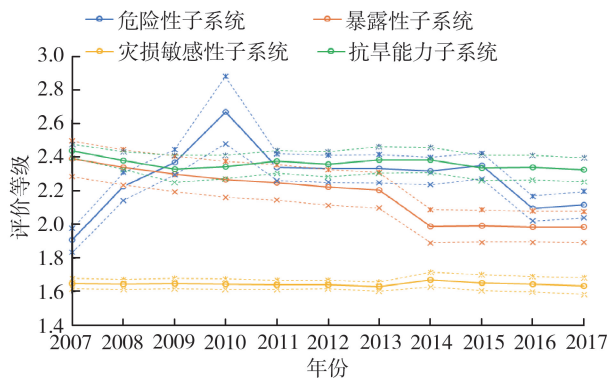
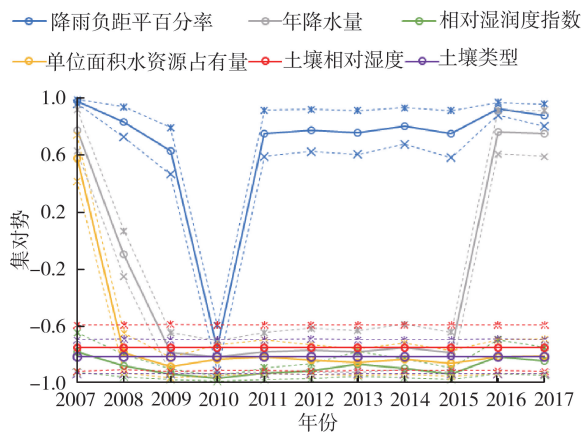


图 3 各子系统旱灾风险评价等级数学期望和 95% 置信区间
Fig.3 Mathematical expectation and confidence interval at 95% confidence level of drought risk evaluation grade of each subsystem

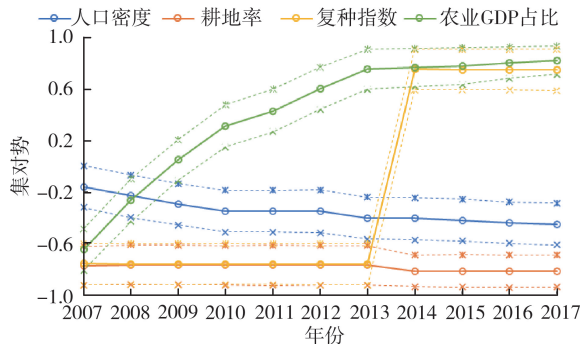
由图 3 可以看出,2007—2017 年宿州市旱灾风险评价的 4 个子系统中,评价等级值变化最大的是危险性子系统,呈现先上升后下降的变化趋势;暴露性子系统评价等级值呈逐年下降的趋势,从 2007 年的 2.282~2.496 下降到 2017 年的 1.892~2.077;灾损敏感性子系统和抗旱能力子系统评价等级值波动较小,相对较为平稳,其中抗旱能力子系统评价等级值基本在 2.2~2.5 之间波动,抗旱能力较差;灾损敏感性子系统评价等级值基本处于 1.6~1.7 之间,评价结果稳定,其风险程度在 4 个子系统中最低。

对比图 2 宿州市旱灾风险评价等级曲线和图 3 中危险性子系统旱灾风险评价等级曲线发现,宿州市旱灾风险评价等级的变化趋势与危险性子系统的变化趋势基本一致,但变化幅度较小,可以推断危险性子系统是宿州市旱灾风险波动的主要原因,其余 3 个子系统则一定程度上减小了宿州市旱灾风险评价等级的波动幅度。例如,2010 年危险性子系统的评价等级值达到峰值,而其他 3 个子系统的评价等级值相对上一年变化均较为平缓,可见危险性子系统的评价等级值突然增大是导致 2010 年宿州市旱灾风险评价等级较高的主要原因;2007—2010 年危险性子系统评价等级值逐年上升且变幅较大,而宿州市旱灾风险评价等级值虽也逐年上升但幅度明显较小,与此同时暴露性子系统评价等级值逐年下降,这在一定程度上减小了宿州市旱灾风险评价等级的上升幅度。

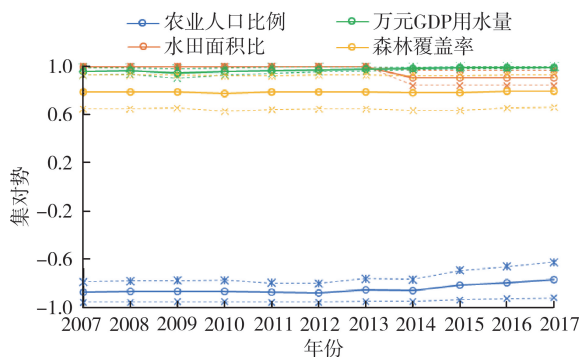
要厘清各子系统的变化原因,还需进一步对各指标进行分析,进而识别旱灾风险系统的脆弱性指标,提出有针对性的旱灾风险管理对策。图 4 中实线表示各指标联系数集对势的数学期望,相同颜色的虚线表示该指标联系数集对势 95% 置信区间的边界值。从图 4(a)可以看出危险性子系统的 6 个指标中,除降雨负距平百分率联系数集对势大部分



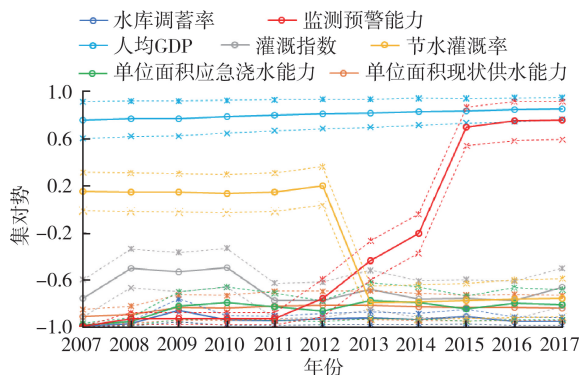
(a) 危险性子系统



(b) 暴露性子系统



(c) 灾损敏感性子系统



(d) 抗旱能力子系统

图4 各指标联系数集对势数学期望值和95%置信区间

Fig. 4 Mathematical expectation and confidence interval at 95% confidence level of connection number set pair potential for each index

处于同势外,其余5个指标联系数集对势大部分时间均处于反势,尤其是相对湿度指数、土壤相对湿度和土壤类型联系数集对势在2007—2017年均处于反势。分析发现,这些指标主要决定于水文气象条件或本身的自然条件,可见,宿州市干旱灾害危险性较大,且较难人为降低。

由图4(b)可以看出暴露性子系统的4个指标中,宿州市人口密度联系数集对势在2007年处于均势和偏反势之间,到2017年已经完全处于偏反势,总体呈下降趋势;耕地率联系数集对势变化不大,一直处于反势;复种指数联系数集对势在2007—2013年一直处于反势,2014年突变为同势;农业GDP占比联系数集对势在2007—2017年稳步上升,从介于反势和偏反势之间上升为同势。由此可见,暴露性子系统旱灾风险评价等级值逐年降低主要受农业GDP占比影响,而2013—2014年出现较大幅度下降则是由于复种指数的改变。

由图4(c)可以看出灾损敏感性子系统中水田面积比、万元GDP用水量和森林覆盖率这3个指标联系数集对势一直处于同势,而农业人口比例联系数集对势却一直处于反势,因此要想进一步降低灾损敏感性,就必须从减小农业人口比例着手,例如通过提高农业机械化水平,发展第二、三产业等方法来达到减小农业人口比例的目的。

由图4(d)可以看出在抗旱能力子系统中水库调蓄率、单位面积现状供水能力、灌溉指数、单位面积应急浇水能力联系数集对势均一直处于偏反势或反势;节水灌溉率联系数集对势虽在前几年处于偏同势和均势之间,但2012后也下降为反势,这些都是宿州市抗旱能力总体表现较差的原因。监测预警能力虽自2012年起有较大改善,但在抗旱能力子系统中未能体现,分析原因可能是因为监测预警能力权重较小。相对其他几个子系统,抗旱能力子系统的指标最易调控,因此,要降低宿州市旱灾风险,最便捷的方法就是提高宿州市抗旱能力,结合宿州市抗旱能力现状,可以采取修建水库、增加水库调蓄率、兴建灌溉系统、发展节水灌溉、加大水利建设投入等方法来提高宿州市抗旱能力。

3 结语

本文提出将联系数集对势构造为服从期望为 $(a - c) / (1 + b)$ 、标准差为 $b^2 / 3$ 的正态分布的随机变量,建立了基于联系数集对势置信区间估计的旱灾风险分析模型,采用95%置信区间作为评价结果,以置信区间的长短反映评价结果不确定性大小。以宿州市为例对该模型进行验证,模型分析结果表

明,2007—2017年宿州市旱灾风险评价等级值总体变化不大,在1.9~2.3之间波动,总体处于轻险状态;4个子系统中,对宿州市旱灾风险评价等级影响较大的是危险性子系统和暴露性子系统;宿州市抗旱能力较差,有必要通过采取修建水库、增加水库调蓄率、兴建灌溉系统、发展节水灌溉、加大水利建设投入等方法来提高宿州市抗旱能力,进而降低旱灾风险。该结果与已有研究结果相一致,说明基于联系数集对势置信区间估计的旱灾风险分析模型合理有效。与已有研究相比,本文模型评价结果不再是一个数值,而是一置信概率区间,提供了关于评价结果可靠性方面的信息,能够反映受多种不确定因素综合影响下的旱灾风险实际情况,在复杂系统动态分析评价中具有应用前景。

参考文献:

[1] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(5):425-432. (in Chinese))

[2] 金菊良,汤睿,周戎星,等. 基于联系数的城市水生态文明建设评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(4):1-6. (JIN Juliang, TANG Rui, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation method for urban water eco-civilization construction based on connection number [J]. Water Resources Protection,2021,37(4):1-6. (in Chinese))

[3] 金菊良,徐新光,周戎星,等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(1):1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree [J]. Water Resources Protection,2021,37(1):1-6. (in Chinese))

[4] 张志君,陈伏龙,龙爱华,等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护,2020,36(2):53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis [J]. Water Resources Protection,2020,36(2):53-58. (in Chinese))

[5] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2000.

[6] 周家红,许开立,陈志勇. 系统动态安全评价研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2008,29(3):416-419. (ZHOU Jiahong, XU Kaili, CHEN Zhiyong. On the dynamic assessment of system safety [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2008, 29

(3): 416-419. (in Chinese))

[7] 李德顺. 基于广义集对分析的系统危险性评价研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.

[8] 潘争伟,吴成国,周玉良,等. 基于集对指数势的流域水资源系统脆弱性影响因子分析[J]. 水电能源科学,2014,32(3):39-43. (PAN Zhengwei, WU Chengguo, ZHOU Yuliang, et al. Driving factors analysis of basin water resources system vulnerability based on set pair exponential potential [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(3): 39-43. (in Chinese))

[9] MEN Baohui, LIU Huanlong. Evaluation of sustainable use of water resources in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on s-type functions and set pair analysis [J]. Water, 2018, 10(7), 925.

[10] 金菊良,沈时兴,郇建强,等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(1):1-9. (JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 1-9. (in Chinese))

[11] CHEN Menglu, NING Shaowei, CUI Yi, et al. Quantitative assessment and diagnosis for regional agricultural drought resilience based on set pair analysis and connection entropy[J]. Entropy, 2019, 21(4):373.

[12] ZHOU Rongxing, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Agricultural drought vulnerability assessment and diagnosis based on entropy fuzzy pattern recognition and subtraction set pair potential[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(1): 51-63.

[13] 金菊良,刘鑫,周戎星,等. 水资源承载力动态评价的引力减法集对势方法[J]. 水利水运工程学报,2021(2):38-45. (JIN Juliang, LIU Xin, ZHOU Rongxing, et al. Gravity based subtractive set pair potential method for dynamic evaluation of water resources carrying capacity [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(2): 38-45. (in Chinese))

[14] 金菊良,沈时兴,崔毅,等. 半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用[J]. 水利学报,2021,52(5):507-520. (JIN Juliang, SHEN Shixing, CUI Yi, et al. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity in the Yellow River diversion irrigation district based on semipartial subtraction set pair potential [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(5): 507-520. (in Chinese))

[15] 何飘. 基于联系数的区域水资源承载力动态分析评价[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.

(下转第92页)

- 市 LID 设施布设比例优化[J]. 给水排水, 2021, 57(增刊 1): 475-481. (LI Ying, MO Shuhong, YANG Yuanyuan, et al. Optimize proportions of LID facilities with NSGA-II [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57 (Sup1): 475-481. (in Chinese))
- [21] 陈前虎, 邹澄昊, 黄初冬, 等. 基于多目标粒子群算法的 LID 设施优化布局研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(19): 126-132. (CHEN Qianhu, ZOU Chenghao, HUANG Chudong, et al. Optimization of LID facilities layout based on multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(19): 126-132. (in Chinese))
- [22] 刘春腊, 马丽, 刘卫东. 洪水灾害社会经济损失评估方法研究述评[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 136-141. (LIU Chunla, MA Li, LIU Weidong. Evaluation methods on social and economic loss of flood disaster [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 136-141. (in Chinese))
- [23] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks 的城市水系水文水动力过程耦合模拟; 以福州市江北城区及东北部山区为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 609-616. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Coupling simulation of hydrological and hydrodynamics processes for urban river networks based on InfoWorks; case of the urban area and the northeast mountainous area in Fuzhou City [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 609-616. (in Chinese))
- [24] 曾招财. 城市内涝风险评估及海绵措施减控效果研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [25] 李辉, 李娜, 俞茜, 等. 海绵城市建设基本原则及灰色与绿色结合的案例浅析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(1): 1-9. (LI Hui, LI Na, YU Qian, et al. Integrating green and gray infrastructure into a sustainable future [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, 15(1): 1-9. (in Chinese))
- [26] 徐冰, 雷晓辉, 王昊, 等. 基于 SWMM 模型的沿海城市内涝模拟研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(3): 211-218. (XU Bing, LEI Xiaohui, WANG Hao, et al. Research on urban flooding simulation in a coastal city based on SWMM model [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(3): 211-218. (in Chinese))
- [27] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市洪涝模拟及其风险分析; 以福州市白马河片区为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 784-793. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. InfoWorks ICM flood simulation and risk analysis; case of Baima River district, Fuzhou [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(6): 784-793. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-11-17 编辑: 施业)

(上接第 78 页)

- [16] 金菊良, 周戎星, 崔毅, 等. 结构水资资源学概论[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 7-19. (JIN Juliang, ZHOU Rongxing, CUI Yi, et al. Introduction to structural water resources science [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 7-19. (in Chinese))
- [17] ROSENBLATT M. A central limit theorem and a strong mixing condition [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1956, 42(1): 43-47.
- [18] DERIGGI D. A central limit theorem for correlated variables with limited normal or gamma distributions[J]. Communications in Statistics: Theory and Methods, 2019, 48(21): 5213-5222.
- [19] PARK W, NAM K, CHOI S. Determination of the minimum detectability of surface plasmon resonance devices by using the 3σ rule[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2020, 76(11): 1010-1013.
- [20] 金菊良, 赵行玥, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在区域旱灾风险评估中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 36-44. (JIN Juliang, ZHAO Xingyue, CUI Yi, et al. Application of semipartial subtraction set pair potential method to the dynamic assessment of regional drought risk [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021 (1): 36-44. (in Chinese))
- [21] 金菊良, 陈鹏飞, 陈梦璐, 等. 水文水资源学家陈守煜先生学术研究的知识图谱分析[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1282-1290. (JIN Juliang, CHEN Pengfei, CHEN Menglu, et al. Knowledge map analysis of academic research of Mr. Chen Shouyu hydrological and water resources specialist [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10): 1282-1290. (in Chinese))
- [22] CUI Yi, FENG Ping, JIN Juliang, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method[J]. Entropy, 2018, 20(5): 359.
- [23] 戚尚恩, 张学贤, 孙义, 等. 淮北地区小麦播期干旱发生规律及其影响与对策研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(21): 46-53. (QI Shang'en, ZHANG Xuexian, SUN Yi, et al. Studies on the influence and countermeasures of drought and occurrence rule in wheat sowing time in Huabei area [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(21): 46-53. (in Chinese))
- [24] 杜云. 淮河流域农业干旱灾害风险评估研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.

(收稿日期: 2021-12-28 编辑: 施业)