

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2022.04.002

矿山地面塌陷区地质灾害风险模糊综合监测方法

谢 浪

(四川省冶金地质勘查院, 成都 610051)

摘 要: 为了获取塌陷区地质灾害风险指数, 判断风险程度, 提出一种矿山地面塌陷区地质灾害风险模糊综合监测方法。初选指标后, 利用相关系数法和偏最小二乘法再选指标, 构建评价指标体系; 利用层次分析法和因子分析法计算选出评价指标的综合权重; 计算指标权重与模糊隶属矩阵之间的乘积, 得出矿山地面塌陷区地质灾害风险模糊综合监测指数, 对比评价等级表, 划分地质灾害风险等级。结果表明: 利用所研究方法划分了某煤矿区 1 区为高风险区, 3 区、4 区为中风险区, 7 区、6 区、2 区为低风险区, 5 区为极低风险区。完成了矿山地面塌陷区地质灾害风险模糊综合监测, 可以为防治策略的提出提供可靠的依据, 具有实用性意义。

关键词: 矿山地面塌陷区; 地质灾害; 指标选取; 权重计算; 风险监测; 模糊综合评价

中图分类号: TP222.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854(2022)04-0007-07

Fuzzy comprehensive monitoring method for geological disaster risk in mine ground subsidence area

XIE Lang

(Sichuan Institute of Metallurgical Geology & Exploration, Chengdu 610051, China)

Abstract: In order to obtain the geological disaster risk index of subsidence area and judge the risk degree, a fuzzy comprehensive monitoring method for geological disaster risk in mine ground subsidence area is proposed. After the primary selection of the indicators, the correlation coefficient method and partial least square method are used to reselect the indicators to construct the evaluation index system. The comprehensive weight of the selected evaluation indexes is calculated by analytic hierarchy process and factor analysis. The product between the index weight and the fuzzy membership matrix is calculated to obtain the fuzzy comprehensive monitoring index of geological disaster risk in mine ground subsidence area, the evaluation grade tables are compared, and the geological disaster risk areas are determined. The results show that using the research method, a coal mine area is divided into No. 1 area as high risk area, No. 3 and No. 4 areas as medium risk area, No. 7, No. 6 and No. 2 areas as low risk area and No. 5 area as very low risk area. The fuzzy comprehensive monitoring of geological disaster risk in mine ground subsidence area is completed, which can provide a reliable basis for the prevention and control strategy, and has practical significance.

Key words: mine ground subsidence area; geological hazards; index selection; weight calculation; risk monitoring; fuzzy comprehensive evaluation

各种矿产资源是生产、生活的物质基础, 矿产资源的消耗量一直在增长, 为满足这种增长的需要,

矿产资源一直被开采。矿产资源从矿山中被开采出来, 原有矿产资源在矿山中所在位置就会中空, 而在重力作用下, 采空区不稳定, 容易发生地质活动, 地表出现塌陷区, 发生地质灾害, 如滑坡、裂缝、泥石流等, 给地面工程带来极大的安全隐患^[1]。在此背景下, 如何有效地实现矿山地面塌

收稿日期: 2021-12-27

第一作者: 谢浪, 水工环高级工程师, 土木工程专业, 主要研究方向为地质灾害防治技术、矿山水工环调查技术等。E-mail: aoyuan04101@163.com

陷区地质灾害风险监测具有重要的现实意义。通过明确矿山地面塌陷区地质灾害风险情况,为提出针对性的预防措施、及时规避风险、减少灾害损失、保证人员生命安全提供了可靠的依据^[2]。

基于上述背景,很多专家和学者在发表的文献中提出了矿山地面塌陷区地质灾害风险监测方法。例如,周超等^[3]以贵州省盘关镇矿山为研究区,选择坡度、坡向、高程、曲率等作为评估指标,然后选用证据权重法计算指标权重,构建一种评估模型,对矿山地质灾害进行评估。靳昊等^[4]以鞍钢集团弓长岭铁矿为例,选择14个指标作为评估指标,利用层次分析法计算指标权重,然后对单指标属性进行测度,最后将单指标属性与权值进行相乘,得出风险综合测度值,根据综合测度值划分危险等级。李小刚等^[5]以张家岭煤矿I区为例,选取15种影响因素作为评价指标,然后利用AHP法和熵权法计算指标权重,最后计算矿区地面塌陷危险性综合测度值,并结合置信度原则,得出风险等级。

结合前人研究经验,提出一种矿山地面塌陷区地质灾害风险模糊综合监测方法。模糊综合监测法是一种基于模糊数学理论而设计的方法,在计算出风险综合评价数值之后,根据隶属度规则,得出风险等级。通过本研究以期对矿山地面塌陷区地质灾害风险防治策略的提出提供可靠的依据。

1 矿山地面塌陷区地质灾害风险模糊综合监测方法研究

矿山中的矿产资源被开采后,会形成采空区,而采空区的存在会引发一系列地面塌陷区地质灾害,给地面工程造成危险,危害地面人员生命安全。针对上述问题,为提前进行有效的灾害预警,减少灾害带来的损失,进行矿山地面塌陷区地质灾害风险监测具有重要的现实意义^[6]。在本研究中,以模糊综合评价法构建一种监测模型。该模型构建主要分为评价指标选取、指标权重计算以及模糊综合监测等级判断等步骤。下面针对这几个步骤进行具体分析。

1.1 矿山地面塌陷区地质灾害风险评价指标选取

矿山地面塌陷区地质灾害风险模糊综合监测模型构建的第一步是选择合适数量的评价指标。评价指标选取过多,会增大计算量;评价指标选取过少,不能全面描述地质灾害问题,评价结果不准

确^[7]。针对上述情况,首先在五项评价指标选取原则指导下,即代表性原则、全面性原则、易获性原则、客观性原则、系统性原则,尽可能选出所有相关指标^[8]。然后针对初选出的指标,利用相关系数法和偏最小二乘法进行指标再次筛选,具体过程如下:

步骤1:输入初选矿山地面塌陷区地质灾害风险评价指标。

步骤2:评价指标标准化。计算公式如下:

$$x' = \frac{x - \min x}{\max x - \min x} \quad (1)$$

式中, x' 为处理后的指标; x 为原始指标; $\max x$ 为指标数据集中的最大值; $\min x$ 为指标数据集中的最小值。

步骤3:计算评价指标相关系数 r ,计算公式如下:

$$r_{ij} = \sqrt{\frac{\zeta(i,j)}{d(i)+d(j)}} \quad (2)$$

式中, $\zeta(i,j)$ 为两个指标之间的协方差; $d(i)$ 为指标 x 的方差; $d(j)$ 为指标 y 的方差。

步骤4:计算每一个指标与剩余所有指标的相关系数的平方值,计算公式如下:

$$r_i^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (r_{ij} - 1)}{n-1} \right]^2 \quad (3)$$

式中, r_i^2 为指标 i 与剩余所有指标的相关系数的平方值; n 为指标数量且大于1。

步骤5:比较 r^2 ,删除相关指标个数最大的指标。

步骤6:提取剩余指标的偏最小二乘法主成分。

步骤7:交叉性检验,利用通过检验的指标构建偏最小二乘回归模型。

步骤8:利用偏最小二乘回归模型计算评价指标的回归系数。

步骤9:计算回归系数的绝对值,并比较大小。

步骤10:删除回归系数的绝对值最小的指标。

经过指标相关系数以及回归系数的计算,分别删除了相关指标个数最大和回归系数的绝对值最小的指标,完成了指标最终的选取^[9]。根据选取的指标,构建评价指标体系。

1.2 评价指标权值计算

基于选取出来的矿山地面塌陷区地质灾害风险

评价指标,本章节利用层次分析法和因子分析法计算指标综合权值。指标权值是指指标之间的相对重要程度的度量^[10]。计算方法有客观法和主观法两种,但各有缺点,因此从两类方法中各选一种,分别计算指标权重,最后将两者结合在一起,计算指标综合权重值。这样可以极大地避免指标权重计算偏差^[11]。

1) 层次分析法计算评价指标权重

步骤 1: 将指标划分为层次结构。

步骤 2: 采用 1~9 标度法构造判断矩阵 L 。

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2n} \\ & & \cdots & \\ l_{m1} & l_{m2} & \cdots & l_{mn} \end{bmatrix} = (l_{ij})_{nm} \quad (4)$$

式中, l_{ij} 表示评价指标 i 对评价指标 j 的相对重要性数值,赋值见表 1; m 、 n 代表判断矩阵行数和列数。

表 1 1~9 标度法

Table 1 1~9 scale method

标度值	含义(评价指标 i 对评价指标 j)
1	同等重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	强烈重要
9	极为重要
2, 4, 6, 8	1、3、5、7、9 相邻判断的中值
倒数	评价指标 j 对评价指标 i 的相对重要程度, $l_{ji} = \frac{1}{l_{ij}}$

步骤 2: 确定各评价指标的权重。

Step 1: 归一化处理判断矩阵 L 中每一列指标后再按行相加,得到 $\bar{w}_i$ 。

Step 2: 根据 $\bar{w}_i$ 得出的结果组成向量 $\bar{w} = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \cdots, \bar{w}_i, \cdots, \bar{w}_m)^T$ 。

Step 3: 对向量 $\bar{w}$ 做正规处理,得到 $W = (w_1, w_2, \cdots, w_i, \cdots, w_m)$ 。其中, w_i 为权重系数。

步骤 3: 层次单排序及其判断矩阵的一致性检验。公式如下:

$$\begin{cases} \beta = \frac{\alpha}{\chi} \\ \alpha = \frac{\lambda_{\max} - \gamma}{\gamma - 1} \end{cases} \quad (5)$$

式中, β 为一致性比例,当该值 < 0.1 ,通过检验; α 为一致性指标; χ 为随机一致性指标; γ 为判断矩阵的阶数; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征根。

步骤 4: 同理,进行层次总排序和一致性检验^[12]。

2) 因子分析法计算评价指标权重

步骤 1: 输入评价指标。

步骤 2: 指标标准化处理,见公式(1)。

步骤 3: 计算指标相关系数,并组成相关矩阵 R ,见公式(2)。

步骤 4: 计算 R 的特征根 $\mu_i (i = 1, 2, \cdots, m)$ 以及对应的特征向量 $Q_i (i = 1, 2, \cdots, m)$ 。

步骤 5: 将 $\mu_i (i = 1, 2, \cdots, m)$ 与 $Q_i (i = 1, 2, \cdots, m)$ 相乘,选取前 k 个相乘值组成载荷矩阵。

步骤 6: 用特征根计算选出主因子(评价指标)。

步骤 7: 因子(评价指标)旋转。

步骤 8: 因子(评价指标)得分。

步骤 9: 对因子(评价指标)得分进行归一化处理。

步骤 10: 计算因子(评价指标)权重 w_i' 。公式如下:

$$w_i' = p \cdot 100 \quad (6)$$

式中, p 为归一化处理后的因子分值^[13]。

3) 指标综合权重

基于上述两种方法计算出来的指标权重,将二者结合起来,计算指标综合权重^[14]。计算公式如下:

$$V_i = \sqrt{\frac{w_i \cdot w_i'}{\sum_{i=1}^n (w_i + w_i')}} \quad (7)$$

式中, V_i 为指标综合权重。

1.3 模糊综合监测实现

基于上述两个章节的计算结果,本章节利用模糊综合评价法对矿山地面塌陷区地质灾害风险等级进行判断。具体过程如下:

步骤 1: 根据选取的指标建立评价指标集。

步骤 2: 计算指标权重,见章节 1.2。

步骤 3: 确定隶属度,也就是建立评价结果与评语对应规则^[15]。隶属度计算公式如下:

$$Y(x) = 0, A_2 \leq x \quad (8)$$

$$Y(x) = \frac{A_2 - x}{A_2 - A_1}, A_1 \leq x \leq A_2 \quad (9)$$

$$Y(x) = 1, 0 \leq x \leq A_1 \quad (10)$$

式中, $Y(x)$ 为隶属度函数; x 为各评价指标的量值; A_1 、 A_2 为相邻两个评价等级。

步骤 4: 确定矿山地面塌陷区地质灾害风险评价集 F 。

$$F = \{f_1, f_2, f_3, f_4\} \quad (11)$$

式中,评价集对应的评语和分值情况如表 2 所示。

表 2 评语和分值对应表

Table 2 Corresponding table of comments and scores

评价	f_1	f_2	f_3	f_4
评语	极低风险区	低风险区	中风险区	高风险区
分值	<60	$60\sim70$	$70\sim90$	>90

步骤 5: 建立评价指标与评价集之间的模糊隶属矩阵 $U^{[16]}$ 。

步骤 6: 计算矿山地面塌陷区地质灾害风险模糊综合监测指数。计算公式如下:

$$Z = V \cdot U \quad (12)$$

式中, Z 代表风险模糊综合监测指数。

将得出的模糊综合监测指数与表 2 对比, 得出矿山地面塌陷区地质灾害风险等级。

2 实例分析

2.1 研究区

所选择的研究区为某煤矿采集区, 该采集区共分为 7 个区域, 如图 1 所示。

由该煤矿采集区的信息化系统历史数据库可知, 目前, 其 1 区为高风险区, 3 区、4 区为中风险区, 7 区、2 区为低风险区, 6 区、5 区为极低风险区。

以该煤矿采集区为例, 应用研究的模糊综合监

测方法进行矿山地面塌陷区地质灾害风险等级评价, 并对照历史数据库, 分析矿山地面塌陷区地质灾害风险模糊综合监测方法的监测结果与实际情况的拟合程度, 判断实用性。

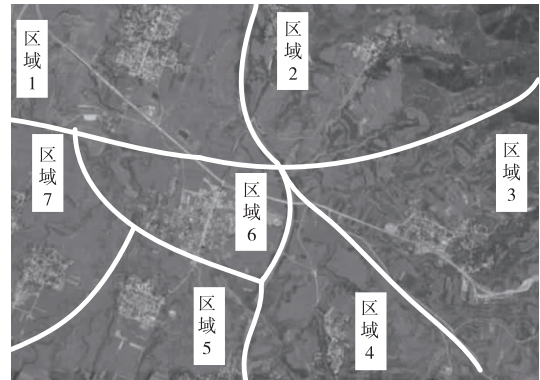


图 1 研究区

Fig. 1 Study area

2.2 评价指标选取

按照章节 1.1 描述的指标选择流程, 选择该煤矿区的风险评价指标, 结果如表 3 所示。

表 3 评价指标体系

Table 3 Evaluation index system

一级指标	二级指标	三级指标	相关系数	回归系数的绝对值
矿山地面塌陷区 地质灾害风险	矿区地质相关指标	地质构造	8.255 2	0.825 0
		岩体完整性	8.560 0	0.745 2
		水文信息	7.842 2	0.863 2
		塌陷区坡度	7.922 1	0.745 6
	岩体力学相关指标	抗压强度	8.256 2	0.825 0
		抗拉强度	8.125 0	0.726 3
		抗剪强度	8.214 0	0.711 4
	采空区相关指标	采空区面积	8.152 2	0.725 2
		采空区深度	7.262 0	0.822 4
		采空区宽度	7.845 6	0.715 5
		采煤层数	8.225 4	0.847 1
		煤层倾角	7.562 2	0.625 2
		顶板管理方法	7.415 0	0.744 6
	采矿工程相关指标	采矿施工防护措施	7.285 6	0.714 5
		采矿施工技术	7.485 2	0.774 4

2.3 评价指标权重计算

利用层次分析法和因子分析法计算指标综合权重, 计算结果如表 4 所示。

表 4 评价指标体系
Table 4 Evaluation index system

二级指标	指标综合权重	三级指标	指标综合权重
矿区地质相关指标	1.256 2	地质构造	0.125 2
		岩体完整性	0.233 5
		水文信息	0.267 2
		塌陷区坡度	0.352 5
岩体力学相关指标	1.447 3	抗压强度	0.415 5
		抗拉强度	0.325 6
		抗剪强度	0.212 2
采空区相关指标	1.652 5	采空区面积	0.325 2
		采空区深度	0.152 5
		采空区宽度	0.541 4
		采煤层数	0.082 2
		煤层倾角	0.071 2
		顶板管理方法	0.125 5
采矿工程相关指标	0.125 0	采矿施工防护措施	0.044 4
		采矿施工技术	0.045 3

2.4 模糊综合监测指数计算结果

利用公式(12)计算矿山地面塌陷区地质灾害风险模糊综合监测指数，计算结果如图 2 所示。

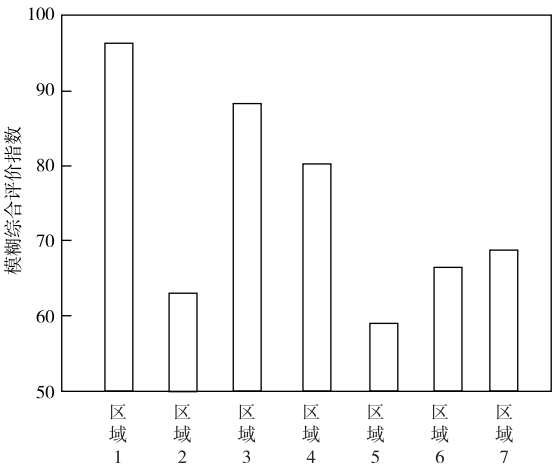


图 2 模糊综合监测指数计算结果

Fig. 2 Calculation results of fuzzy comprehensive monitoring index

从图 2 中可以看出，1 区模糊综合监测指数最高、之后排序为 3 区、4 区、7 区、6 区、2 区、5 区。

2.5 研究区地面塌陷区地质灾害风险等级划分

根据计算出来的模糊综合监测指数对照表 2，划分图 1 研究区各个采矿区的地质灾害风险等级。结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，1 区为高风险区，3 区、4 区为中风险区，7 区、6 区、2 区为低风险区，5 区为极低风险区。1 区矿产资源已经开采结束，地质结构被完全破坏，留有大面积的采空区，在自然因

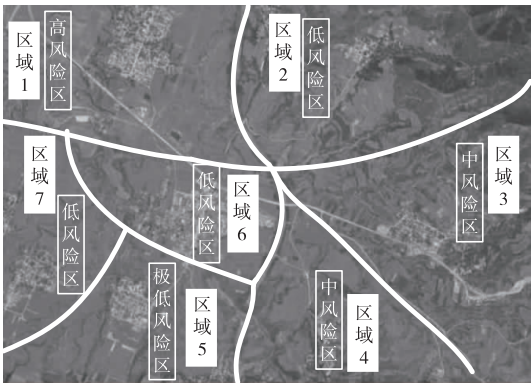


图 3 采矿区地质灾害风险等级划分结果

Fig. 3 classification results of geological hazard risk in mining area

素和周围采矿工程的影响下，极易发生地质灾害。

上述结果中，仅 6 区的监测结果与实际情况不同，初步分析，可能是由于主观法在指标选取过程中，指数占比较多；但是大体上，获取的地质灾害风险模糊综合监测指数符合该研究区实际情况，即实用性得到保证。

3 结语

为满足生产、生活的需要，需要进行不断的矿产资源开采，而不断的矿产资源开采会造成开矿区极易容易发生地质灾害，给开采工程和开采人员都带来极高的风险。针对上述问题，提出一种基于矿山地面塌陷区地质灾害风险模糊综合监测方法，通过实例分析，证明了所研究方法在实际情况中的有效性。然而，本研究仍存在一些不足，即为了保证指标权重计算的准确性，采用了两种结合的方法计

算了权重,导致风险监测效率较低。针对这一点,有待进一步提高。

参考文献

- [1] 刘钟森,宋勇军,赵文涛,等. 基于地基变形控制的采空区地面塌陷地质灾害防治[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(26): 101-106.
LIU Z S, SONG Y J, ZHAO W T, et al. Prevention of geologic hazard in goaf based on foundation deformation control[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(26): 101-106.
- [2] 陈钢,汤明高,周泓,等. 山区线性工程地质灾害风险动态评价方法及应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(3): 524-532.
CHEN G, TANG M G, ZHOU H, et al. Dynamic risk assessment method of geological hazard of linear engineering in mountainous area and its application[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3): 524-532.
- [3] 周超,常鸣,徐璐,等. 贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1782-1791.
ZHOU C, CHANG M, XU L, et al. Risk assessment of typical urban mine geological disasters in Guizhou province[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45 (11): 1782-1791.
- [4] 靳昊,陈彦好,周宗青,等. 基于属性识别理论的金属矿山采空区塌陷灾害风险评估[J]. 金属矿山, 2021, 50(3): 184-190.
JIN H, CHEN Y H, ZHOU Z Q, et al. Risk assessment of collapse disaster in goaf of metal mine based on attribute recognition theory [J]. Metal Mine, 2021, 50(3): 184-190.
- [5] 李小刚,高海刚. 基于未确知理论的地面塌陷危险性评价方法[J]. 煤炭技术, 2020, 39(3): 125-129.
LI X G, GAO H G. Risk assessment method of ground collapse based on unascertained theory[J]. Coal Technology, 2020, 39(3): 125-129.
- [6] 范文涛. 某矿山地质灾害模糊综合评价研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(6): 76-78.
FAN W T. Study on fuzzy comprehensive evaluation of geological hazard in a mine[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(6): 76-78.
- [7] 周静静,张晓敏,赵法锁,等. 陕南秦巴山区地质灾害危险性评价研究[J]. 地质力学学报, 2019, 25(4): 544-553.
ZHOU J J, ZHANG X M, ZHAO F S, et al. Research on risk assessment of geological hazards in Qinling-Daba mountain area, south Shaanxi province[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(4): 544-553.
- [8] 李文博,张洪岩,彭超. 基于 AHP-FCE 模型的岩溶地面塌陷灾害易发程度分区评价[J]. 中国矿业, 2021, 30(6): 195-199.
LI W B, ZHANG H Y, PENG C. Evaluation of the susceptibility of karst ground collapse disaster based on AHP-FCE model[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(6): 195-199.
- [9] 杨柳,牟鑫亮,李晨,等. 延安市宝塔区地质灾害风险评价[J]. 山地学报, 2020, 38(5): 679-690.
YANG L, MOU X L, LI C, et al. Risk assessment of geological hazards in Baota district, Yan'an City, Shaanxi, China[J]. Mountain Research, 2020, 38(5): 679-690.
- [10] 李冠宇,李鹏,郭敏,等. 基于聚类分析法的地质灾害风险评价——以韩城市为例[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10629-10638.
LI G Y, LI P, GUO M, et al. Application of cluster analysis method in geological hazard risk assessment: A case study of Hancheng city [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10629-10638.
- [11] 刘明喆,孔凡青,张浩,等. 基于层次分析法和模糊综合评价的突发水污染风险等级评估[J]. 水电能源科学, 2019, 37(1): 53-56.
LIU M Z, KONG F Q, ZHANG H, et al. Grade assessment of sudden water pollution based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(1): 53-56.
- [12] 张杰,毕攀,魏爱华,等. 基于模糊综合法的烟台市栖霞中桥岩溶塌陷易发性评价[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 215-220.
ZHANG J, BI P, WEI A H, et al. Assessment of susceptibility to karst collapse in the Qixia Zhongqiao district of Yantai based on fuzzy comprehensive method [J]. Carsologica Sinica, 2021, 40 (2): 215-220.
- [13] 罗路广,裴向军,谷虎,等. 基于 GIS 的“8. 8”九寨沟地震景区地质灾害风险评价[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 193-202.
LUO L G, PEI X J, GU H, et al. Risk assessment of geohazards induced by “8. 8” earthquake based on GIS in Jiuzhaigou scenic area[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(3): 193-202.