

近距离煤层开采大巷煤柱受力特性评估

Assessment of Stress Characteristics of Coal Pillars in Close Range Coal Seam Mining

白武, 王志乾, 李光柱, 韩明玉 (鄂尔多斯市昊华精煤有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200)

摘要: 本文以内蒙古某煤矿近距离煤层开采条件为研究背景, 对受上部煤柱传递应力影响下的大巷煤柱岩体受力和状态特性进行了研究, 对不同煤柱留设宽度条件下煤柱受力规律进行了分析, 并利用神经网络模型实现了对煤柱特性的评估。研究表明在近距离煤层开采条件下, 上层煤柱的集中应力会向下部煤柱传递, 进而造成下部煤柱应力叠加, 同时带来煤体中破碎区和塑性区范围的明显增加, 随着煤柱宽度的减小, 煤柱应力集中程度也进一步增加。通过构建的神经网络模型可以实现对近距离煤层开采大巷煤柱应力和状态的有效评估。

关键词: 煤柱; 受力特性; 近距离煤层; 神经网络模型

中图分类号: TD823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)06-0029-05

Abstract: This article takes the close range coal seam mining conditions of a coal mine in Inner Mongolia as the research background. This study was conducted on the stress and state characteristics of the rock mass of the main roadway coal pillar under the influence of stress transmission from the upper coal pillar, and the stress law of the coal pillar under different coal pillar widths was analyzed. The research results indicate that under the conditions of close range coal seam mining, the concentrated stress of the upper coal pillar will be transmitted to the lower coal pillar, causing stress superposition in the lower coal pillar. At the same time, it will significantly increase the range of the fracture zone and plastic zone in the coal body. As the width of the coal pillar decreases, the degree of stress concentration in the coal pillar also further increases. The constructed neural network model can effectively evaluate the stress and state of coal pillars in close range coal seam mining.

Key words: coal pillar; stress characteristics; close range coal seam; neural network model

1 前言

留设煤柱是保护巷道安全的重要方法^[1], 特别是对于井下大巷, 考虑到其安全和围岩稳定性的重要性, 对煤柱的留设有更高的要求^[2-3]。煤柱受力特性是关系煤柱和巷道围岩稳定性的重要因素, 特别是对于近距离煤层开采条件下的大巷煤柱, 上水平煤柱的集中应力会进一步叠加到下水平的煤柱上, 造成下部煤柱受力的进一步增加, 导致下部煤柱的受力和变形特性更复杂, 对煤柱承载和稳定性都有重要影响, 如何合理的评估上部煤柱影响下的大巷煤柱受力特性是工程中关心的重要问题。

很多学者对近距离煤层开采条件下巷道煤柱的受力和布设开展了研究工作, 目前主要集中在两个方面, 一是研究近距离开采条件下煤柱受力

变形特性, 包括对近距离煤层煤柱下开采应力分布特征和煤柱底板下应力传递规律的研究^[4-5], 以及各煤层大巷围岩移动变形特征的研究^[6]; 二是对近距离影响下煤柱稳定性及留设宽度的研究, 主要包括煤柱稳定性的分析^[7-8]以及在此基础上的煤柱合理留设的研究^[9]。但针对应力叠加影响下煤柱受力特性的表征分析及评估方法仍缺少相关的研究工作。本文以内蒙古某煤矿近距离煤层开采条件为研究背景, 对不同条件下大巷煤柱岩体受力和状态特性进行了评估, 探究了上水平煤柱集中应力影响下的煤柱受力特性, 并利用神经网络模型给出了煤柱特性的评估方法, 为类似工程提供借鉴。

2 工程背景

内蒙古某煤矿井田范围内开采6层煤, 已布置两个开采水平, 一水平开采2-2中煤, 煤层埋深164 m, 煤层厚度0.80~4.61 m, 平均厚度3.11 m, 二水平开采3-1煤, 煤层埋深188 m, 煤层厚度0.80~6.09 m, 平均2.3 m, 两层煤层间距平均约24 m, 两层煤顶底板岩性以砂质泥岩、粉砂岩为主。

[作者简介] 白武(1983—), 男, 汉, 山西大同人, 本科, 高级工程师, 从事采矿工程研究。

[引用格式] 白武, 王志乾, 李光柱, 等. 近距离煤层开采大巷煤柱受力特性评估[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(6): 29-33.

两水平大巷基本采用重叠布置,目前一水平 2-2 中煤已开采完毕(煤柱留设宽度 100 m),正在进行二水平 3-1 煤的开采,考虑到两层煤之间距离较近,因此

上水平的煤柱应力会对下水平煤柱受力带来影响,二水平煤柱受力和留设安全问题是目前关心的重要问题。主要岩层的物理力学特性见表 1。

表 1 主要岩层的物理力学特性参数

| 名称 | 密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 体积模量 K/GPa | 剪切模量 G/GPa | 黏聚力 c/MPa | 内摩擦角 $\phi/(\text{°})$ | 层厚 h/m |
|---------|--|------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| 细粒砂岩 | 2 620 | 8.5 | 5.6 | 5.52 | 35 | 34 |
| 中粒砂岩 | 2 598 | 8.24 | 6.14 | 5.84 | 33 | 16 |
| 砂质泥岩 | 2 520 | 6.28 | 4.3 | 6.6 | 30 | 12 |
| 细粒砂岩 | 2 620 | 8.5 | 5.6 | 5.52 | 35 | 5 |
| 砂质泥岩 | 2 520 | 6.28 | 4.3 | 6.6 | 30 | 8 |
| 2-2 中煤层 | 1 300 | 0.95 | 0.88 | 1.5 | 25 | 3.42 |
| 粗粒砂岩 | 2 570 | 7.95 | 6.87 | 6.12 | 31 | 10 |
| 砂质泥岩 | 2 520 | 6.28 | 4.3 | 6.6 | 30 | 14 |
| 3-1 煤层 | 1 300 | 0.95 | 0.88 | 1.5 | 25 | 5.74 |
| 砂质泥岩 | 2 520 | 6.28 | 4.3 | 6.6 | 30 | 34 |

3 煤柱应力传递机理分析

当煤层回采后,采空区侧煤柱由于支承压力的影响会造成应力分布的集中,进而造成煤柱状态的变化,高的集中应力会带来煤体的破裂或裂隙扩展,根据煤柱煤体状态的差异,可以将煤柱划分为破碎区、塑性区和弹性区^[10]。在近距离煤层开采条件下,由于两煤层煤柱之间的垂直间距很近,上层煤柱的集中应力会向下部煤柱传递,进而造成下部煤柱应力叠加,具体如图 1 所示。相比于单一煤层条件

的煤柱峰值应力 Q_1 ,当临近上部煤柱应力集中水平较高时,近距离双煤层开采条件下下部煤柱峰值应力 Q_2 会明显的高于 Q_1 ,应力的变化进而会改变煤柱破碎区、塑性区和弹性区不同状态煤体的分布范围,会造成煤柱破碎区和塑性区范围的进一步增加,进而影响煤柱的安全和稳定性,合理的评估受上部煤柱影响下的大巷煤柱受力特性是进行煤柱留设的关键,近距离条件下煤柱应力如何叠加影响,煤体状态如何变化是本文需要考虑的重要问题。

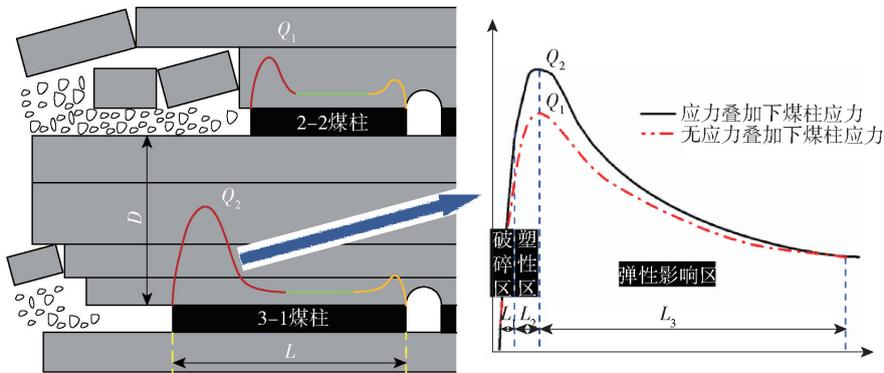


图 1 煤柱应力特性分析

4 数值分析

4.1 数值模型

为了评估在上水平煤柱应力影响下的下层煤柱受力特性,本文利用 FLAC3D 软件构建了数值计算模型,依据实际工程地质条件建立模型,将模型底部约束水平和竖向位移,模型侧面约束水平位移,模型

顶面施加垂直向下应力模拟上覆岩层实际地应力条件。如图 1 所示,模型尺寸为 240 m × 200 m × 94 m,岩体采用库伦摩尔模型,模型岩层从底部向上共分为 10 层,具体岩层参数见表 1。在施加岩体自重应力的基础上,对煤层和大巷进行了开挖,研究了不同开挖条件下煤柱上的应力分布和煤体状态情况。

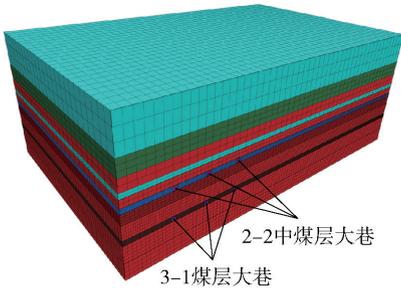


图2 数值仿真模型

4.2 数值仿真结果分析

通过数值仿真模型分析了3-1煤层在不同的煤柱留设宽度 L 条件下大巷煤柱的受力特性,为了分析近距离开采煤柱应力叠加带来的影响,分别计算了2-2中煤未开采(单水平开采)和2-2中煤开采(双水平开采)条件下3-1煤层大巷保护煤柱的受力特性,得到了 $L=100\text{ m}$ 和 $L=60\text{ m}$ 时岩层中的竖向应力分布特性,结果如图3所示。

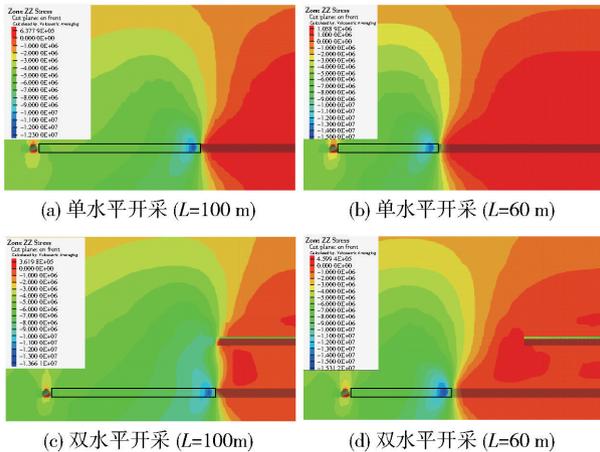


图3 不同煤柱宽度条件下竖向应力分布云图

从图3中可以看出,两种条件下煤柱应力分布特征基本一致,都符合图1所述的应力分布特点。单水平开采条件下,煤柱应力特性大致相同,在双水平近距离开采条件下,由于上下煤柱尺寸的不同,应力叠加的范围存在一定的差异性。相比于单水平开采条件,在双水平近距离煤层开采条件下,下部3-1煤层煤柱应力集中程度更高,应力集中范围更大,随着煤柱宽度的减小,3-1煤层煤柱应力集中程度也进一步增加。为了进一步分析不同煤柱宽度条件(60 m、80 m、100 m)下煤柱应力特性,绘制了煤柱应力分布曲线,具体如图4所示。

从图4中可以看出,在不同条件下,煤柱应力分布曲线形态大致类似,但峰值应力有较大的差异性。临近双水平煤层开挖条件下,3-1煤层煤柱宽度从

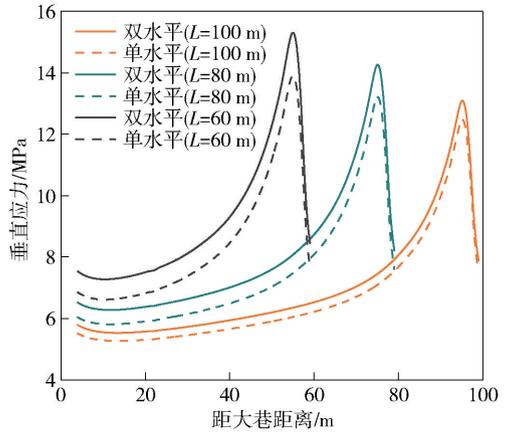


图4 不同煤柱宽度条件下煤柱应力分布曲线

100 m减小到60 m后,其峰值应力增加了17%。相对于单一煤层开采,当煤柱宽度分别为100 m、80 m和60 m时,由于应力叠加带来的煤柱竖向峰值应力增量分别为1.5 MPa、1.1 MPa和0.7 MPa,在大巷附近处,煤柱应力增量分别为0.8 MPa、0.5 MPa和0.3 MPa,近距离煤层开挖带来的应力叠加效应较明显。

进一步分析了不同条件下的煤柱状态特性,对比了两种条件下煤柱破碎区、塑性区和弹性区的分布情况,具体如图5所示。双水平条件下得到的塑性区分布宽度(9.14 m)与现场实测煤柱岩体破裂范围(8~10 m)整体一致。从图中可以看出,在近距离双水平煤层开采条件下,煤柱应力水平的提高进一步造成了煤柱岩体破裂状态的提高,煤体中破碎区和塑性区范围明显增加,整体塑性和破碎区最大宽度增加了约25%。合理的评估煤柱的破裂状态和范围对煤柱稳定性评价有重要意义。

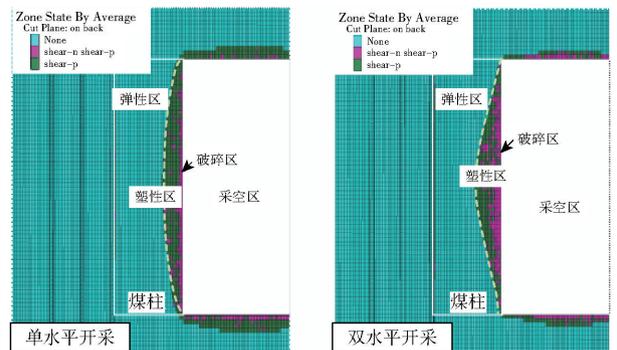


图5 不同条件下煤柱岩体状态分布特性

5 基于神经网络的煤柱特性评估方法

上述分析表明,不同岩体和开挖条件下,煤柱受力和破裂状态存在较大的差异性,为了更好的评估

近距离煤层开挖条件下煤柱应力及状态特性,本文采用BP神经网络构建了煤柱特性评估模型,神经网络可以通过大量的样本数据和反馈机制,学习输入参量和输出参量之间的映射关系,并用学习构建的模型实现对问题的预测。本文利用MATLAB中提供的工具箱进行前馈神经网络模型的构建,同时工具箱进行神经网络的训练和调整,实现模型的训练和测试。

考虑到影响煤柱稳定特性的主要因素包括岩体的特性和两层煤柱的尺寸条件,而根据图1煤柱特性的分析,煤柱受力和破裂特性可以通过煤体破坏范围、煤柱应力峰值进行表征,因此本文选取了岩体特性参数和煤柱尺寸参数(岩体黏聚力 c 、岩体内摩擦角 ϕ 、煤柱宽度 L 、煤层间距 D)作为输入变量,煤柱特性参数(塑性区宽度 L_1 、破碎区宽度 L_2 和煤柱峰值应力大小 Q_2)作为输出变量构建了神经网络模型。

神经网络包括输入层、隐含层和输出层,具体如图6所示。对于给定的一组输入参数,通过网络向前逐步传递参数,得到相应的输出值,计算得到的输出变量和真实输出变量之间的误差,定义为损失函数,通过计算损失函数的梯度,使用梯度下降算法,按照负梯度方向更新模型参数,减小网络输出结果和真实输出值之间的误差,从而构建符合实际问题的模型。

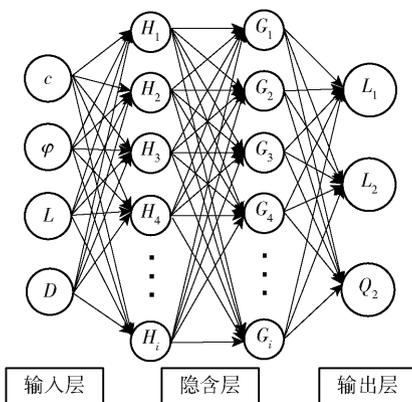


图6 BP神经网络模型图

通过仿真软件计算了50个不同组合输入参数条件下的仿真模型,计算得到了每个模型在对应输入参数条件下的输出参数(煤柱特性参数),主要输入参数和得到的输出参数的取值范围见表2。每个模型的输入参数和输出参数作为一个样本,形成了有50组数据的数据库,以70%样本数据作为训练

集,剩余30%样本数据作为测试集,进行了神经网络模型的训练和测试评估。

表2 输入输出参数的取值范围

| 输入参数 | 黏聚力 c/MPa | 内摩擦角 $\phi/(\text{°})$ | 煤柱宽度 L/m | 煤层间距 D/m |
|------|-----------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| 取值范围 | 1~5 | 25~38 | 60~100 | 20~30 |

训练过程中输出参数的均方误差随着训练次数的增加而逐渐降低,当超过8次训练次数后,均方误差逐渐稳定于较低值。通过训练的神经网络模型分别预测了训练集和测试集的输出结果,测试集实际输出参数与预测参数对比见表3所示,针对三个预测参数分别计算了平均误差,结果见表4所示。

表3 测试集实际输出与预测参数对比

| 编号 | 实际 | 实际 | 实际 | 预测 | 预测 | 预测 |
|----|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| | L_1/m | L_2/m | Q_2/MPa | L_1/m | L_2/m | Q_2/MPa |
| 1 | 1.18 | 6.22 | 13.80 | 1.21 | 6.41 | 14.11 |
| 2 | 1.25 | 6.76 | 13.18 | 1.19 | 6.54 | 12.67 |
| 3 | 1.51 | 7.99 | 13.67 | 1.61 | 7.87 | 13.40 |
| 4 | 1.56 | 8.41 | 13.78 | 1.49 | 8.50 | 14.31 |
| 5 | 1.89 | 9.69 | 13.15 | 1.81 | 9.81 | 13.32 |
| 6 | 1.63 | 8.32 | 14.62 | 1.66 | 8.59 | 15.14 |
| 7 | 1.85 | 8.77 | 14.88 | 1.77 | 8.24 | 14.75 |
| 8 | 1.83 | 8.27 | 14.93 | 1.78 | 8.33 | 15.21 |
| 9 | 2.25 | 9.56 | 14.91 | 2.22 | 9.23 | 14.61 |
| 10 | 1.89 | 7.77 | 14.14 | 1.84 | 7.81 | 13.80 |
| 11 | 2.07 | 8.15 | 14.62 | 2.19 | 8.03 | 14.69 |
| 12 | 2.67 | 8.94 | 16.06 | 2.57 | 9.03 | 16.75 |
| 13 | 2.86 | 9.44 | 15.79 | 2.82 | 9.42 | 15.66 |
| 14 | 3.12 | 10.10 | 16.15 | 3.23 | 11.22 | 16.50 |
| 15 | 3.41 | 11.27 | 16.16 | 3.52 | 10.79 | 16.71 |

表4 预测参数的误差统计

| 预测参数 | 训练集平均误差/% | 测试集平均误差/% |
|-------|-----------|-----------|
| L_1 | 2.85 | 2.94 |
| L_2 | 4.11 | 4.94 |
| Q_2 | 1.21 | 2.34 |

从表4统计结果看,预测模型对煤柱峰值应力的预测精度更高,通过测试集和训练集数据进行预测的各参数的平均误差比例都在5%以下,神经网络模型效果良好,验证了模型的可靠性,表明通过该方法可以实现对近距离煤层开采大巷煤柱应力和状

态的有效评估。

6 结论

以内蒙古某煤矿近距离煤层开采条件为研究背景,针对上下水平煤柱受力叠加影响的问题,对大巷煤柱岩体受力和破裂特性进行了评估,主要得到以下主要结论:

(1)相比于单一煤层条件,当临近上部煤柱应力集中水平较高时,近距离双煤层开采会造成煤柱应力水平的进一步提高;随着煤柱宽度的减小,煤柱应力集中程度也进一步增加。

(2)在近距离双水平煤层开采条件下,煤体中破碎区和塑性区范围明显增加,整体塑性和破碎区最大宽度增加了约25%。

(3)神经网络模型可以较好的表征近距离影响下的开挖条件和煤柱受力特性的关系,能实现对近距离煤层开采大巷煤柱应力和状态的有效评估。

[参考文献]

- [1] 王旭. 安山煤矿大巷煤柱合理尺寸研究[D]. 西安:西安科技大学,2018.
- [2] 元轶,朱向阳,王承亮,等. 基于突变理论的深部煤柱

稳定性[J]. 科学技术与工程,2024,24(15):6234-6240.

- [3] 田柯. 浅埋厚煤层大巷保护煤柱尺寸留设研究[J]. 华北科技学院学报,2024,21(2):27-34.
- [4] 张伟胜,张继业,闫善飞. 近距离煤层煤柱下开采应力分布特征研究[J]. 能源与环保,2024,46(4):281-286.
- [5] 张杰,孙建平,何义峰,等. 近距离煤层底板应力分布规律及巷道布置研究[J]. 煤炭科学技术,2024,52(8):11-22.
- [6] 王羲,张彪. 近距离煤层开采大巷稳定性数值模拟分析[J]. 中国矿业,2022,31(S1):345-351.
- [7] 任永强. 布尔台矿近距离煤层开采护巷煤柱留设技术研究[J]. 煤炭与化工,2015,38(5):32-35.
- [8] 刘艳红,高贤成,殷帅峰,等. 极近距离煤层叠加煤柱合理布置研究[J]. 煤炭工程,2023,55(8):96-102.
- [9] 吴晓宇,周豪,吴晓伟. 近距离煤层内错开采上下双层位煤柱稳定性研究[J]. 山西冶金,2024,47(4):86-90.
- [10] 于远祥,洪兴,陈方方. 回采巷道煤体荷载传递机理及其极限平衡区的研究[J]. 煤炭学报,2012,37(10):1630-1636.

(上接第28页)

(锚索,柔膜墙体)的主要功能不仅是改善围岩的应力状态,而且允许屈服和变形,以释放膨胀应变能,有效地减少支护压力;②稳定期:在滞后工作面150 m外,变形缓慢进展,趋于稳定。最终顶板下沉量、底鼓量、煤壁侧和巷旁支护体移近量分别为42 mm、25 mm、84 mm和90 mm,检验了新方案的控制效果显著。

[参考文献]

- [1] 郑铮,杨增强,朱恒忠,等. 倾斜煤层沿空异形巷道煤柱宽度与围岩控制研究[J]. 采矿与安全工程学报,2019,36(2):223-231.
- [2] 熊咸玉,戴俊. 缓倾斜煤层直角梯形巷道支护技术[J]. 煤炭学报,2020,45(S1):110-118.
- [3] 陶宏斌. 厚硬顶板切顶留巷最优参数及围岩稳定性分析[J]. 中国矿山工程,2023,52(1):60-66.
- [4] 郭伟. 切顶卸压沿空留巷在燕家河煤业10103综采工作面的应用实践[J]. 中国矿山工程,2021,50(3):

36-39.

- [5] 顾国民. 倾斜煤层沿空留巷围岩变形破坏演化规律[J]. 陕西煤炭,2022,41(3):30-33.
- [6] 田钰钰. 缓倾斜煤层切顶卸压沿空留巷支护应用[J]. 现代矿业,2024,40(7):85-89.
- [7] 张国华,李豫波,李子波,等. 倾斜煤层沿空留巷巷旁充填体承载特性及合理宽度研究[J]. 煤炭工程,2024,56(7):84-91.
- [8] 伍琦,朱永建,任恒. 倾斜煤层厚层坚硬顶板条件下沿空留巷关键参数[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(4):1-11.
- [9] 梁杰. 缓倾斜特厚煤层巷旁充填沿空留巷支护研究[J]. 煤,2023,32(7):38-40+79.
- [10] 巩奉刚. 缓倾斜薄煤层开采沿空留巷支护方案设计及试验分析[J]. 中国机械,2023(9):42-45.
- [11] 张枝伟,尚宇琦,王晓东. 薄煤层半煤岩巷道变形破坏规律研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(3):40-51.