

地铁联络通道冻结法施工冻融全过程温度场发展特性及影响因素分析*

黄洁¹ 何亮¹ 陈军浩²

(1. 中煤科工集团南京设计研究院有限公司, 210031, 南京; 2. 地下工程福建省高校重点实验室, 350108, 福州//第一作者, 高级工程师)

摘要 以福州地铁金山站—金祥站区间联络通道冻结法施工为工程背景,通过现场实测与有限元数值计算相结合方法,开展冻结温度场冻融全过程发展特性及影响因素分析研究。研究结果表明:冻结管内侧土体降温速率为外侧土体降温速率的1.26倍;受冻结管布置影响,喇叭口处冻结壁呈马蹄形,而通道处冻结壁呈类矩形状;正常通道段积极冻结阶段末期,冻结壁有效厚度平均值为2.62 m,平均温度为 $-11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;维护冻结阶段结束时,冻结壁有效厚度增加0.23 m,平均温度降低 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,自然解冻阶段的外侧土体温度回升速率明显高于内侧土体温度回升速率;联络通道冻结温度场发展受不同因素影响较大,在积极冻结阶段早期主要受地层初始地温度影响,积极冻结阶段后期主要受土层导热系数影响。

关键词 地铁;联络通道;冻结法施工;温度场;冻融过程中图分类号 TU472.9:U231. *3;TU472.9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.018

Analysis of Development Characteristics and Influencing Factors of Temperature Field during Metro Cross Passage Thawing Full Process

HUANG Jie, HE Liang, CHEN Junhao

Abstract Taking the frozen cross passage at Jinshan Station-Jinxiang Station interval of Fuzhou Metro as the engineering background, by combining field measurement and finite element numerical calculation, the development characteristics and influencing factors of frozen temperature field thawing full process are analyzed and studied. Research results show that the cooling rate of soil inside the frozen pipe is 1.26 times that of soil outside. Affected by the frozen pipe arrangement, the frozen wall at bell mouth is shaped like a horse foot, while the frozen wall at passage presents a rectangular. At the end of active freezing in normal passage section, the average effective

thickness of frozen wall is 2.62 m, and the average temperature is $-11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. At the end of maintenance freezing, the effective thickness of the frozen wall increases by 0.23 m, and the average temperature decreases by $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. During natural thawing, the soil temperature on the outer side rises significantly faster than that on the inner side. The development of freezing temperature field in cross passage is greatly affected by different factors. The influence of initial ground temperature is mainly at the early active freezing stage, and the influence of soil thermal conductivity is mainly at the late active freezing stage.

Key words metro; cross passage; freezing method construction; temperature field; thawing full process

First-author's address China Coal Technology & Engineering Group Nanjing Design & Research Institute Co., Ltd., 210031, Nanjing, China

为保证地铁运营安全,区间隧道每间隔600 m必须设置1条联络通道。常规联络通道处上下行绕路的线间距为10~15 m。冻结法因具有加固与止水效果良好、提升地层强度明显、绿色无污染、能适用在绝大部分地层中等优点,而被广泛应用^[1-3]。自2000年以来,软弱地层中的联络通道普遍采用“水平冻结法加固+矿山法开挖”的施工模式^[4-6]。冻结工法虽加固优点突出,但由于软弱土层具有含水率高、强度低、结构性强、压缩性高等特点,在冻结加固后土体存在冻胀、融沉、部分区域冻结壁薄弱等风险,故采用冻结法施工的联络通道加固与开挖项目时有事故发生^[7-9]。针对联络通道冻结法施工的安全问题,国内外已有众多专家学者开展研究。文献[10]从去回路盐水温度、冻结帷幕温度、地表变形3个方面总结某线路工程监测的变化规律,并对冻结效果、风险评估进行分析;文献[11]考

* 中煤科工集团南京设计研究院有限公司科技计划项目(ZL20-KY06)

考虑了渗流作用影响,采用蚁群优化算法对地铁隧道开挖人工冻结方案进行优化;文献[12-16]通过有限元计算开展冻结壁温度场发展规律影响研究,并得出了一系列与冻结变化相关的结论。通过查阅文献可以发现,针对温度场发展的研究大部分都是停留在冻结加固阶段,而对联络通道开挖阶段以及后期融化阶段温度场发展变化的研究还较少。本文结合福州地铁冻结法工程实例,进行联络通道冻结-融化全过程冻结温度场发展变化规律研究,以期进一步掌握联络通道施工全过程的安全与稳定性。

1 工程概况

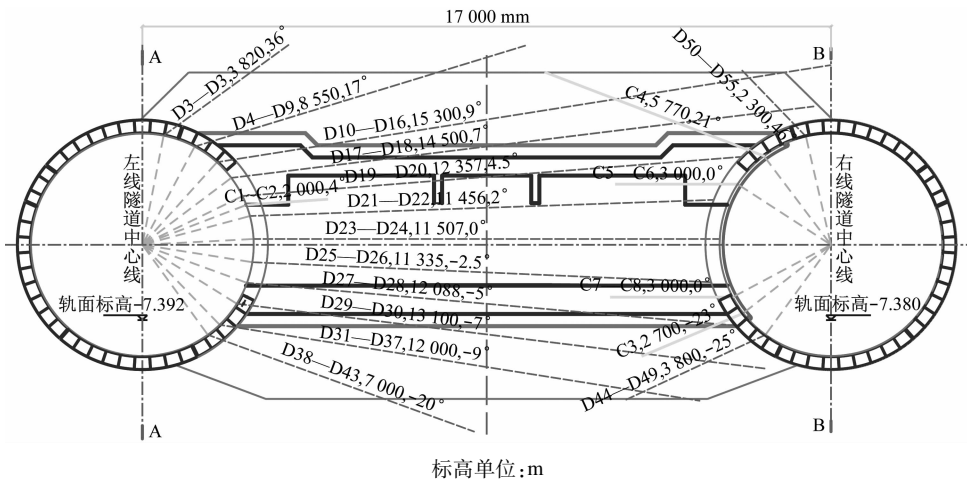
福州地铁 2 号线金山站—金祥站区间联络通道处的中心线间距为 17.0 m,联络通道顶板埋深为

10.15 m,其上方的市政道路下埋设了多条市政管线。联络通道自上而下土层主要为 2-5-2 粗中砂(稍密)、2-5-2 粗中砂(中密)及 2-4-2 淤泥质土。设计采用水平冻结法加固 + 矿山法开挖法施工。联络通道为直墙半圆拱形状,净宽为 2.50 m,净高为 2.70 m。冻结壁设计厚度正常通道段为 1.8 m,喇叭口处为 1.5 m;平均温度 $\leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。设计冻结孔数 59 个。联络通道结构及冻结孔布置情况如图 1 和图 2 所示。

2 冻结温度场数值模拟分析

2.1 建立冻结温度场模型

采用 ANSYS 有限分析软件进行建模分析。考虑到积极冻结结束后温度场影响范围为实际尺



注: D 代表冻结孔, C 代表测温孔; 字串为孔特征描述, 例如“D21—D22, 11456, 2°”表示“冻结孔编号为 D21—D22、深度为 11 456 mm, 冻结孔倾角为 2°”。

图 1 联络通道纵剖面图
Fig. 1 Longitudinal section of cross passage

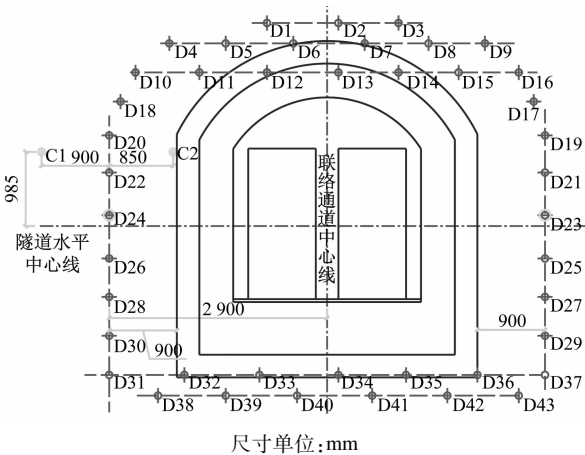


图 2 联络通道横剖面图

Fig. 2 Transverse section of cross passage

寸的 2~3 倍,本文按 3 倍影响范围进行分析。结合工程实际尺寸,建立 40 m×30 m×24 m 的计算模型。由于联络通道所处的地层以粗中砂(中密)为主,因此本次计算对所有地层采用均一化处理,单元类型为 SOLID70。土体常温与低温条件下导热系数分别为 1.45 W/(m·K) 及 1.89 W/(m·K),其余计算参数与地质勘察数据保持一致。计算时将温度荷载与现场实际盐水回路温度保持一致,并将温度直接施加在冻结管上,设置初始地温为 23℃。有限元计算模型图见图 3。

2.2 不同断面的温度场发展对比

联络通道喇叭口处与一般通道段为整个联络

通道代表性位置,故选取积极冻结阶段该两处断面温度场发展情况进行分析,见图 4 及图 5。

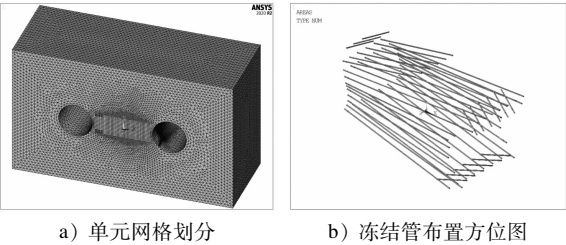


图 3 有限元计算模型图

Fig. 3 Diagram of finite element calculation model

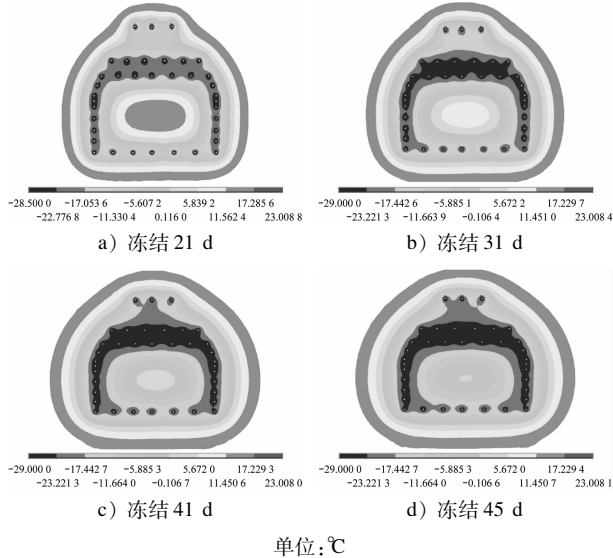


图 4 喇叭口处温度场云图

Fig. 4 Nephogram of temperature field at bell mouth

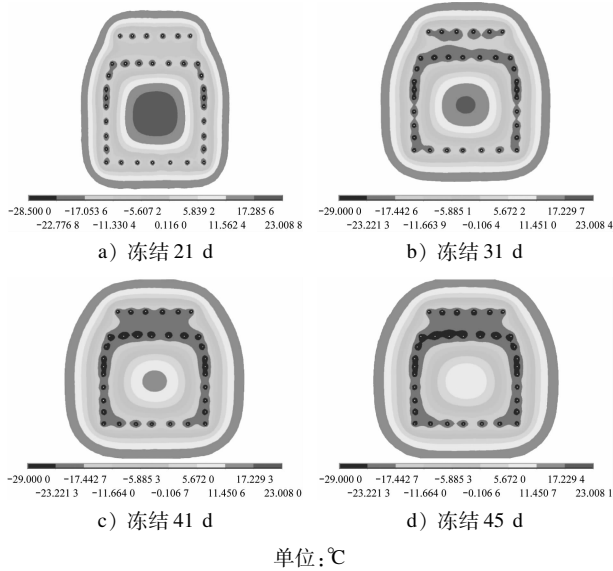


图 5 一般通道处温度场云图

Fig. 5 Nephogram of temperature field in normal passage

由图 4 及图 5 可以看出:不同断面受冻结管布置而影响冻结壁轮廓线的差异较大,喇叭口处冻结壁呈马蹄形,一般通道处冻结壁呈类矩形状;在冻结早期,冻结管内外侧相同距离处的土体温度差异较小。冻结壁交圈后,冻结管内、外侧水力联系隔绝,其中:内侧土体因体积小并处于封闭空间,且土体温度仅受冻结管冷量的影响,故仍保持较大降温速率;外侧土体体量大并与大地直接相连,其土体温度在受冻结管冷量影响的同时,还受大地热源影响,因此外侧土体降温速率较内侧土体降温速率小。

2.3 不同时段温度场发展对比

由冻结温度场模型,可分别获得联络通道一般通道段截面积积极冻结时段、维护冻结时段、自然解冻时段的温度场分布情况,如图 6 所示。

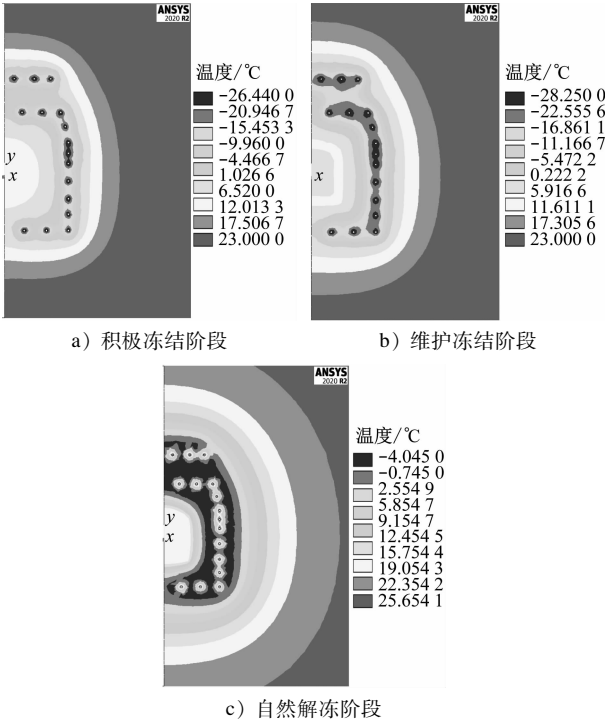


图 6 联络通道一般段中心截面温度分布

Fig. 6 Temperature distribution on the central section of cross passage normal section

联络通道在 3 个不同冻结阶段结束时温度分布存在一定差异。在积极冻结阶段结束时,断面冻结壁的有效厚度平均值达 2.62 m,远大于设计厚度(1.80 m);平均温度达 $-11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,低于设计值($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$),满足开挖条件要求。在维护冻结阶段,由于保持 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度荷载,因此冻结壁有效厚度平均值进一步增加,达到 2.85 m,但冻结壁平均温度为 $-11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,近乎保持不变,表明在维护冻结阶

段,冻结壁强度与稳定性都得到进一步加强,为施工安全性提供了更大的保障。在自然解冻阶段,冻结管停止供冷,冻结壁受大地热源影响,冻结管内外侧土体温度逐渐回升,且外侧土体温度回升速率高于内侧。

3 冻结温度场现场实测与分析

为掌握联络通道冻结温度场发展情况,在地层中布设了 C1—C8 共 8 个测温孔,其中 C1、C2 在主冻结侧,C3—C8 在辅冻结侧,C1、C5、C8 在冻结管外侧,其余测温孔在冻结管内侧。每个测温孔均埋设有 3 个测点,测点深度分别为 0.9 m、2.0 m、3.0 m。为减小外界对土体降温影响,选取孔深为 3.0 m 的测点温度变化情况进行对比分析,见图 7 所示。温度数据采集包括联络通道积极冻结阶段(45 d)与维护冻结阶段(22 d),其中维护冻结阶段即联络通道开挖构筑阶段。

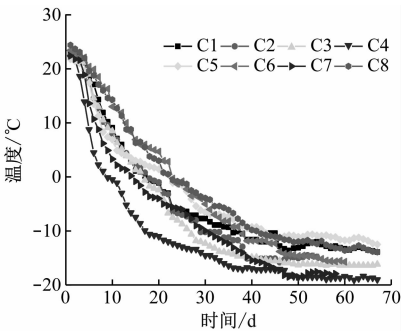


图 7 测温孔温度变化曲线

从图 7 可以看出:在积极冻结前期,靠近冻结管内侧土体温度下降较快;在积极冻结后期,冻结管内外侧土体降温速率相当;在维护冻结阶段,土体温度处于平稳状态,温度变化较小。考虑测点与冻结管之间距离,以及各测点温度降至 -1°C (土体结冰温度)所需要时间,可获得测点处土体降温速度,计算得出冻结管内侧 5 个测点及外侧 3 个测点的降温速度平均值分别为 30.7 mm/d 及 24.4 mm/d ,即冻结管内侧土体降温速度为外侧土体降温速度的 1.26 倍。

为能更好地校核模型的有效性,将 C2 测温孔 2.0 m 深处温度模拟值与实测值进行对比,如图 8 所示。

由图 8 可以看出,C2 测温孔的模拟温度与实测温度皆随时间增加而逐渐降低,变化趋势保持一

致,两者平均温度变化速率差值仅为 0.03°C/d 。可见,冻结温度场模型能较好地反映工程实际温度变化。

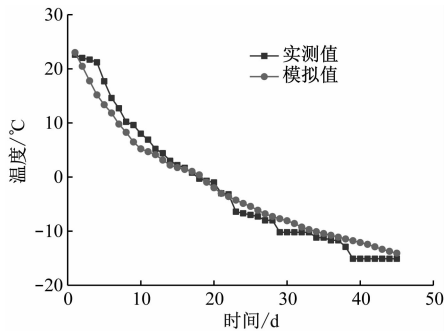


图 8 C2 测温孔 2.0 m 深处温度模拟值与实测值
Fig. 8 Simulation value and measurement value 2.0 m deep in C2 thermometric hole

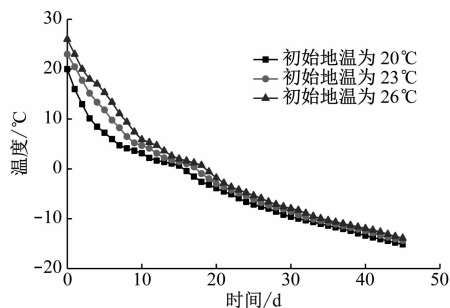
4 冻结温度场发展影响因素

地铁联络通道冻结温度场发展受多种因素影响。从土层埋藏条件来看,地层初始地温与土体导热系数对温度场发展影响较大。基于此,本文通过变换初始地温与导热系数两个参数,分析对比 C2 测温孔深 2.0 m 处测点的温度变化情况。考虑到本工程施工期间(10 月份)实际平均地温为 23°C ,故选取初始地温为 20°C 、 23°C 、 26°C ;导热系数按本工程实际导热系数的 0.9 倍、1.0 倍、1.1 倍取值。通过有限元计算可得测点温度变化情况如图 9 所示。

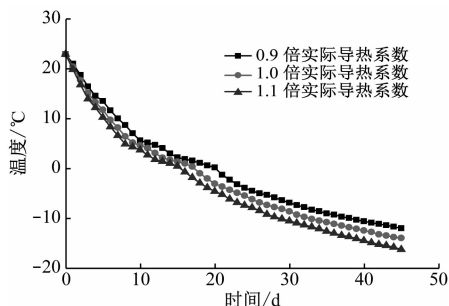
从图 9 a)可知,C2 测点 2.0 m 深处,土体温度降至结冰温度所需时间与初始地温呈正相关的关系,即初始温度越高,所需的时间越长。当初始温度为 20°C 、 23°C 、 26°C 时,土体温度降至结冰温度的时间分别为 16 d、18 d、19 d。随着冻结时间增长,土体最终降温趋于一致。主要特点为:地温越高则初期冻结管周围温差大,所需冷量越大,则土体降温至结冰温度时间越长。当降至结冰温度后,冻结管周边温差减小,其热量交换速率减缓,导致不同地温之间的温度变化差异逐渐减小,且最终趋于一致。

从图 9 b)可知,C2 测点 2.0 m 处的土体温度降至结冰温度所需的时间与导热系数呈负相关的关系,即导热越大所需时间越短。当导热系数为实际导热系数的 0.9 倍、1.0 倍、1.1 倍时,土体由初始土温降至结冰温度的时间分别为 21 d、18 d、16 d。而

且当土体温度降至结冰温度后,不同导热系数的降温曲线差值增大,主要原因为土体温度降至结冰温度后,水受冷冻结、释放潜热,降温变缓,导热系数越大,则相变“阶梯”越短,进而导致冻结后期虽然土体降温趋势一致但差值明显。至冻结 45 d 时,0.9 倍与 1.0 倍实际导热系数影响下的测点温度差值为 1.96 °C,而 1.0 倍与 1.1 倍实际导热系数影响下的测点温度差值为 2.28 °C。



a) 初始地温对测点温度变化的影响



b) 导热系数对测点温度变化的影响

图 9 不同因素对测点温度变化影响

Fig. 9 Influence of different factors on measuring point temperature change

5 结论

1) 土体温度变化受冻结管布置影响较大,冻结管内侧土体降温速度可达外侧土体降温速度的 1.26 倍。

2) 与积极冻结阶段末期相比,维护冻结阶段温度场冻结壁有效厚度进一步增大,但平均温度变化较小,维护冻结有利于冻结壁强度与稳定性提升。

3) 联络通道冻结温度场发展在冻结早期受地层初始地温影响较大,在冻结后期受导热系数影响较大。

参考文献

[1] 周晓敏,王梦恕.人工地层冻结技术在我国城市地下工程中的兴起[J].都市轨道交通,2004(增刊1):77.

ZHOU Xiaomin, WANG Mengshu. AGF technology rises in the urban underground engineering of China[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2004(S1): 77.

[2] 曾华.盾构进出洞处地基水平杯型冻结加固的温度场研究[J].城市轨道交通研究,2016(6):112.

ZENG Hua. On frozen temperature field of horizontal cup-type freezing technology in shield entry engineering[J]. Urban Mass Transit, 2016(6): 112.

[3] 李子威,纪来鹏.人工冻结法在地下工程施工中的应用与发展[EB/OL].(2015-05-27)[2020-11-01].https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/jzgcjsysj2015090238.

LI Ziwei, JI Laipeng. Application and development of artificial freezing method in underground engineering construction[EB/OL].(2015-05-27)[2020-11-01].https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/jzgcjsysj2015090238.

[4] 奚家米,熊元林,马新民,等.地铁联络通道冻结法施工研究现状[J].科学技术与工程,2020(17):6720.

XI Jiami, XIONG Yuanlin, MA Xinmin, et al. Research status of freezing method construction of subway contact passage[J]. Science Technology and Engineering, 2020(17): 6720.

[5] 杨平,陈瑾,张尚贵,等.软弱地层联络通道冻结法施工温度及位移场全程实测研究[J].岩土工程学报,2017(12):2226.

YANG Ping, CHEN Jin, ZHANG Shanggui, et al. Whole range monitoring for temperature and displacement fields of cross passage in soft soils by AGF[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017(12): 2226.

[6] 丁航,李方政,崔兵兵.软土地层冻结加固工程塑料管冻结壁形成规律及影响因素研究[J].城市轨道交通研究,2021(8):187.

DING Hang, LI Fangzheng, CUI Bingbing. Study on formation law and influencing factors of freezing reinforcement project plastic pipe frozen wall in soft soil stratum[J]. Urban Mass Transit, 2021(8): 187.

[7] 郑立夫,高永涛,周喻,等.浅埋隧道冻结法施工地表冻胀融沉规律及冻结壁厚度优化研究[J].岩土力学,2020(6):2110.

ZHENG Lifu, GAO Yongtao, ZHOU Yu, et al. Research on surface frost heave and thaw settlement law and optimization of frozen wall thickness in shallow tunnel using freezing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020(6): 2110.

[8] 李晓英,杜香刚.地铁区间泵房下穿既有地铁结构冻结加固技术研究[J].铁道建筑,2015(2):58.

LI Xiaoying, DU Xianggang. Study on freezing reinforcing technology for running sand during construction of water pump house in running tunnel of Beijing Metro under existing metro structure[J]. Railway Engineering, 2015(2): 58.

[9] 洪荣宝,蔡海兵,鲁婵端.地铁隧道冻结法施工地层融沉研究进展及展望[J].建井技术,2020(3):13.

(下转第 111 页)