

DOI: 10.7672/sgjs2022070085

斜桩与直桩组合多级支护在基坑中的应用与分析*

余地华¹, 田野^{1,2}, 赖国梁¹, 陈国¹, 宋志¹, 张涛¹, 柳瑶¹

(1. 中建三局集团有限公司工程总承包公司, 湖北 武汉 430070;

2. 湖北中建三局建筑工程技术有限责任公司, 湖北 武汉 430070)

[摘要] 在一些基坑工程中, 倾斜桩和多级支护可减少或消除支撑使用、增加悬臂支护深度, 其工程应用也越来越受到重视。基于工程实例, 通过数值计算方法, 开展斜-直组合多级支护结构分级高度比、平台宽度、倾斜角度等参数对支护效果的影响分析。结果表明: 斜桩与多级支护进行组合可显著控制位移, 且最大位移主要发生在第1级支护, 当第1级支护高度较小时, 宜选择一直一斜多级支护结构, 反之, 则宜选择一斜一直结构; 平台宽度<1倍挖深时, 增大平台对减少桩身位移更显著, 平台宽度>1倍挖深时, 桩身位移随平台宽度变化趋于平稳; 第1级为斜桩的多级支护在 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 倾角范围内桩身位移随倾角增加降幅更大, 其后变化趋于均匀; 支护空间较大且位移控制要求更严时, 可采用二斜多级支护结构。工程计算与实测结果表明, 斜桩与直桩组合多级支护效果良好。

[关键词] 基坑; 支护; 斜直桩组合; 多级支护; 参数分析

[中图分类号] TU470

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2022)07-0085-04

Application and Analysis of Inclined Pile and Straight Pile Combined Multi-stage Support in Foundation Excavation

YU Dihua¹, TIAN Ye^{1,2}, LAI Guoliang¹, CHEN Guo¹, SONG Zhi¹, ZHANG Tao¹, LIU Yao¹

(1. General Construction Company of CCTEB Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430070, China;

2. Hubei Building Construction Technology Co., Ltd. of CCTEB Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: In some foundation excavation engineering, inclined pile and multi-stage support can reduce or eliminate the use of support and increase the depth of cantilever support. Based on the engineering example, the influence of parameters such as height ratio, platform width and inclined angle on the supporting effect was analyzed by numerical calculation method. The results show that the combination of inclined pile and multi-stage support can significantly control the displacement, and the maximum displacement mainly occurs in the first stage support. When the first stage support height is small, the inclined multi-stage support structure should be selected. Otherwise, the inclined multi-stage support structure should be selected. When the platform width is less than 1 times the depth, increasing the platform can reduce the pile displacement more significantly. When the platform width is more than 1 times the depth, the pile displacement tends to be stable with the change of platform width. The first level is that the pile displacement decreases more with the increase of inclination Angle in the range of $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$, and then the change tends to be uniform. When the supporting space is larger and the displacement control requirement is more strict, the two-slope multistage supporting structure can be adopted.

Keywords: foundation excavation; supports; oblique-straight pile combination; multistage support; parameter analysis

* 中建股份科技研发课题(CSCEC-2020-Z-34)

[作者简介] 余地华, 总工程师, 教授级高级工程师, E-mail: 23997194@qq.com

[通信作者] 田野, 注册岩土工程师, 硕士, E-mail: 23997194@qq.com

[收稿日期] 2021-11-20

0 引言

倾斜桩支护和多级支护是两种可提高悬臂式支护深度的新型支护结构,在一些装配式廊道、车站和深大沉井等因自身结构不宜使用支撑或其他需要减少或消除支撑使用且支护深度合适的情况下,倾斜桩、多级支护及其组合支护结构不失为一种比较好的选择。

作为推动基坑工程绿色建造和可持续发展的需要,很多学者和工程技术人员对倾斜桩及多级支护开展了广泛研究,如任望东等^[1]开展了多级支护破坏模式及稳定性参数分析;郑刚等^[2]对基坑多级支护的概念、形式、机理及破坏模式进行了研究和总结,首次提出了设置倾斜桩的多级支护形式;翁其平等^[3],刘杰等^[4],李松等^[5]从工程应用的角度,开展了多级支护的工程应用分析;在倾斜桩研究方面,王恩钰等^[6],孔德森等^[7],刁钰等^[8]开展了倾斜桩支护的数值分析,提出了倾斜桩所具有的内力和位移控制优势,其中郑刚等^[9]提出了斜-直交替支护桩的刚架、斜撑和重力三大机理效应;郑刚等^[10]通过三维数值模型和室内试验,开展了倾斜桩支护稳定性及分析方法的研究,从试验角度证明了倾斜桩所具有的支护优势。已有的研究为倾斜桩和多级支护的工程应用奠定了坚实的理论和工程应用基础^[11-12]。受施工影响,一些倾斜桩支护结构在工程实践中较难实现从而制约了其工程应用,而将倾斜桩与多级支护进行结合,可以利用更经济的建筑资源产生更好的支护效果。目前针对斜桩与直桩组合的多级支护结构相关研究较少,相关工程应用也不多,本文以工程实例为基础,分析斜桩与直桩组合的多级支护结构支护方式、支护参数等因素对支护效果的影响,以期对支护结构优化及类似工程提供参考。

1 工程概况及数值模型分析

1.1 工程概况

工程项目位于武汉经济技术开发区硃山湖以南,拟建区属剥蚀堆积垄岗及岗间坳沟地貌,相当于长江三级阶地。项目设置地下室 2 层,基坑周长 1 200m,开挖深度 11.25m,本文选取基坑南侧典型剖面进行分析,结合地下室车道,南侧采用斜桩与直桩组合的多级支护结构进行支护,第 1 级支护高 4.0m,采用桩径 0.9m、间距 2.2m、桩长 18m 直桩;第 2 级支护高 7.25m,采用倾斜 15°、桩径 0.9m、桩间距 1.1m、桩长 16m 斜桩,一、二级平台宽 3m,典型支护剖面如图 1 所示。

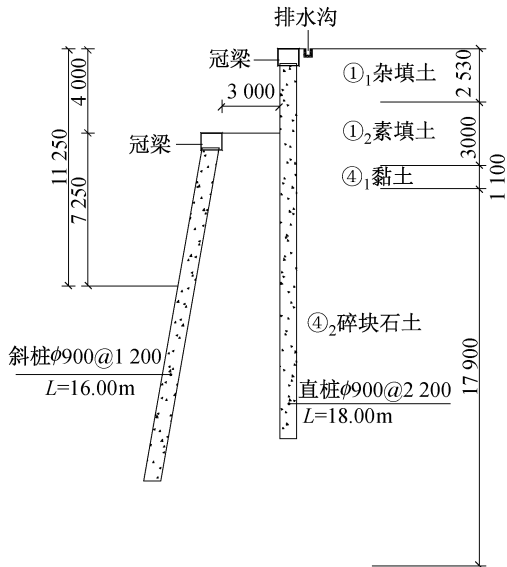


图 1 基坑支护结构剖面

1.2 数值模型分析

本文采用 Plaxis 2D 小应变硬化土模型(HSS)进行土体模拟,根据勘察资料,同时结合当地经验,土层参数如表 1 所示,建立平面模型尺寸及网格如图 2 所示。桩和冠梁采用板单元,弹性模量取 30GPa、重度 25kN/m³、泊松比 0.2。根据刚度等效原则,前斜桩等效厚度 0.71m,后直桩等效厚度 0.56m。模型顶面为自由面,其他各面设置法向约束。

表 1 土层计算参数

层号及名称	γ / (kN/m ³)	c' / kPa	φ' / (°)	E_{50} / MPa	E_{ocd} / MPa	E_{ur} / MPa	G_0^{ref} / MPa
① ₁ 杂填土	19.27	1	24	5.4	4.5	18	54
① ₂ 素填土	19.07	1	27	6.48	5.4	21.6	64.8
④ ₁ 黏土	19.68	0	30	15.12	12.6	50.4	151.2
④ ₂ 碎块石土	20.06	4	33	28.08	23.4	93.6	280.8

注: γ :为土的天然重度; c' 、 φ' 分别为有效黏聚力和内摩擦角; E_{50} 为参考割线模量; E_{ocd} 为参考切线模量; E_{ur} 为参考加卸载模量; G_0^{ref} 为参考初始剪切模量

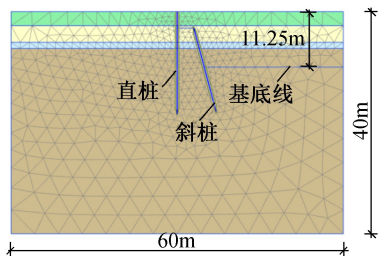


图 2 模型尺寸及网格

1.3 计算结果与实测分析

为验证基坑开挖效果,在南侧采用斜桩与直桩组合的多级支护位置设置深层土体测斜管,同时将

数值计算的水平位移与实测结果进行对比,如图3所示。数值计算第1级支护直桩最大桩身位移为22.20mm,第2级支护斜桩最大桩身位移为9.12mm,监测最大水平位移为19.31mm,数值计算与实测第1级直桩位移接近,第2级斜桩位移明显小于土体深层位移。同时数值计算显示,整体位移主要还是发生在第1级支护或基坑上部,且直桩和斜桩存在端部位移,这是由于斜桩作用使桩底有朝向基坑的运动趋势^[7]。数值计算与监测结果对比表明了基坑结构的安全性和数值计算的可靠性,模型较好地反映了基坑开挖的变形特性。

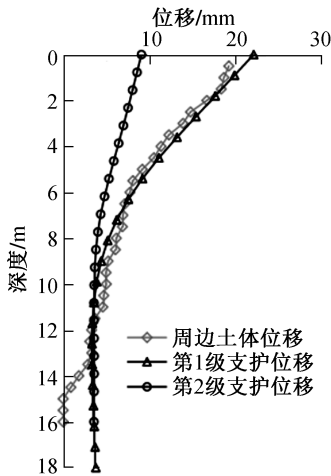


图3 实测与计算结果对比

2 参数影响分析

为进一步研究斜桩与直桩组合的多级支护结构支护方式、支护参数等因素对支护效果的影响,采用简化模型,取④₁黏土作为单一土层进行计算分析,模型尺寸与前述实例一致,模型中支护桩等效厚度为0.60m、支护桩长均为15m、支护深度为10m。本文研究一直一斜、一斜一直及两斜多级支护方式的开挖效果(见图4),比较不同开挖深度比 H_1/H_2 、不同平台宽度 B 及不同倾斜角度下,斜桩与直桩组合的多级支护结构位移变化情况,从而分析参数变化对支护效果的影响。几何参数分析取值如表2所示。

表2 参数取值范围

几何参数	取值范围
$H_1/H_2/m$	3/7, 4/6, 5/5, 6/4, 7/3
B/m	5, 10, 15, 20, 25
倾角/ $^\circ$	0, 5, 10, 15, 20

2.1 支护类型及分级高度

为研究不同支护类型及分级高度对支护结构位移的影响,分别计算一直一斜、一斜一直及两斜多级支护结构桩身位移,同时计算两直多级支护结

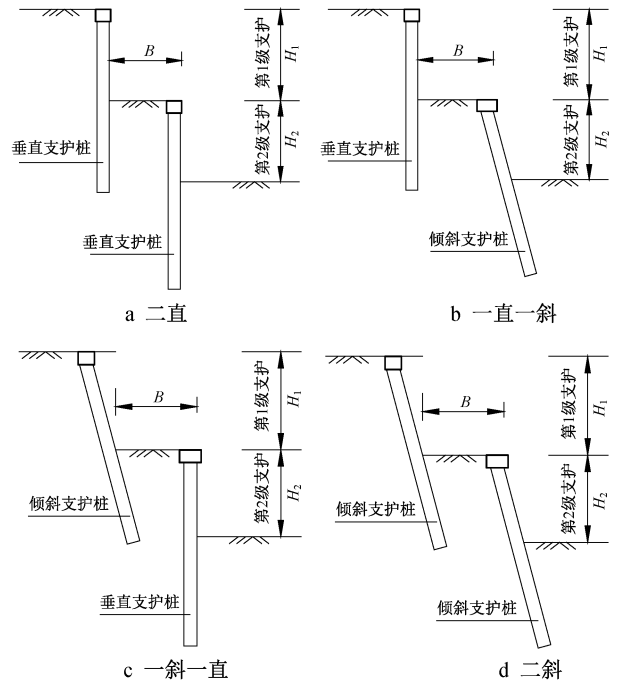


图4 斜直组合多级支护结构

构进行对比分析,其中分级平台宽度为4m、斜桩角度为 15° ,计算结果如图5所示。结果表明,斜桩与直桩组合的多级支护结构中第1,2级桩身位移均明显小于对应的两直桩多级支护,且第1级桩身位移均大于第2级桩身位移,说明将斜桩与多级支护进行组合可显著控制位移,且最大位移均发生在第1级支护。一直一斜各级支护位移随 H_1/H_2 增大而增大,一斜一直各级支护位移随 H_1/H_2 增大而增大,但当第1级支护高度小于第2级支护高度时($H_1/H_2 < 5/5$),一直一斜相比一斜一直各级位移更小,说明当第1级支护高度较小时,可优先选择一直一斜多级支护结构,反之,则优先选择一斜一直结构,同时在结构选择中要考虑斜桩对地下室结构的影响及各级支护桩间的相互影响。若支护空间允许,也可采用二级均为斜桩的分级支护结构,其各级桩身位移相比其他结构更小,且受分级高度的影响也较小。

2.2 平台宽度

图6为计算一直一斜、一斜一直及两斜多级支护结构桩身位移随平台宽度的变化,其中分级高度 H_1/H_2 为5/5、斜桩角度为 15° 。结果表明,各类型多级支护结构在平台宽度 $< 10m$ 时(1倍挖深),各级位移随平台宽度快速减小;平台宽度为 $10 \sim 20m$ 时(1~2倍挖深),各级位移随平台宽度缓慢减小;平台宽度 $> 20m$ 时(2倍挖深),各级位移随平台宽度变化趋于平稳直至无显著影响。在1倍基坑挖深范围内增大平台宽度,对斜桩与直桩组合的多级支

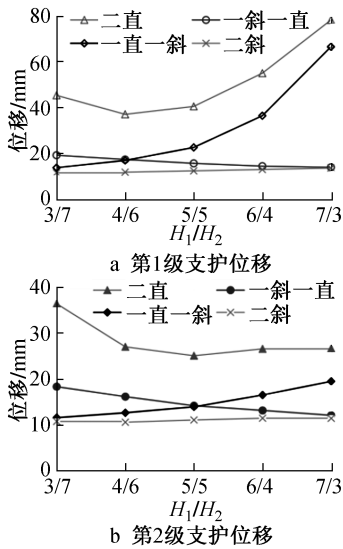


图5 斜-直组合多级支护不同分级高度位移

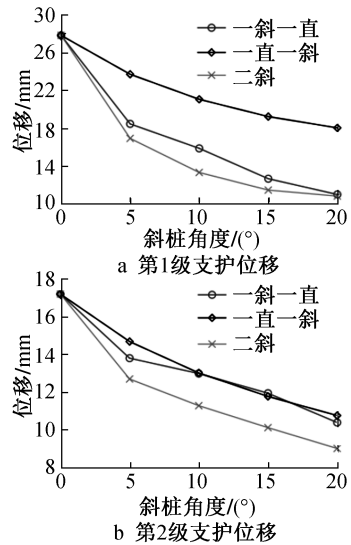


图7 斜-直组合多级支护不同倾斜角度位移

护结构减控制位移效果更好。

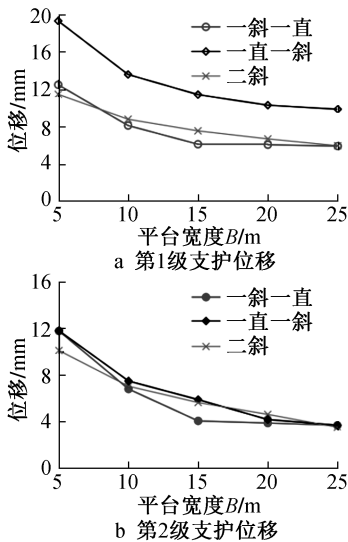


图6 斜-直组合多级支护不同平台宽度位移

2.3 倾斜角度

图7为斜-直组合多级支护结构桩身位移随倾斜角度的变化,其中分级高度 H_1/H_2 为5/5、平台宽度 B 为5m。计算表明,斜-直组合结构每级支护桩身位移均随角度增大而减小,其中一斜一直及二斜多级支护结构在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 倾角范围内位移下降更快,其后桩身位移受角度影响变化较均匀。考虑支护结构总体位移主要发生在第1级支护中,第1级支护采用斜桩支护位移控制效果更优,同时要考虑支护桩倾斜时的交叉影响及倾斜桩端嵌固应穿过滑裂面一定深度,以保证支护的整体稳定性。同样,二斜多级支护结构因其更好的位移控制效果,在支护空间较大或位移控制要求较严情况下,可以优先采用。

3 结语

本文以工程实例为基础,通过数值计算与实测分析,验证斜桩与直桩组合多级支护良好的位移控制优势和支护效果。采用简化模型,开展斜-直组合多级支护结构分级高度比、平台宽度、倾斜角度等参数对支护效果的影响分析,得到主要结论如下。

1)斜桩与多级支护进行组合可显著控制位移,且最大位移主要发生在第1级支护。根据分级高度对支护结构位移的影响分析,当第1级支护高度较小时,可优先选择一直一斜多级支护结构,反之,则宜选择一斜一直结构。

2)在1倍基坑挖深范围内增大平台宽度,对斜桩与直桩组合的多级支护结构减少位移效果更好,平台宽度超过1倍挖深时,各级桩身位移随平台宽度变化趋于平稳。

3)第一级为斜桩的多级支护在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 倾角范围内桩身位移随倾角增加降幅更大,其后变化趋于均匀,工程中需满足斜-直组合多级支护的整体稳定性,在支护空间较大或位移控制要求更严时,可采用二斜多级支护结构。

参考文献:

[1] 任望东,张同兴,张大明.深基坑多级支护破坏模式及稳定性参数分析[J].岩土工程学报,2013,35(S2):919-922.
 [2] 郑刚,郭一斌,聂东清,等.大面积基坑多级支护理论与工程应用实践[J].岩土力学,2014,35(S2):290-298.
 [3] 翁其平,王卫东.多级梯次联合支护体系在上海虹桥综合交通枢纽基坑工程中的设计与实践[J].建筑结构,2012,42(5):172-176.
 [4] 刘杰,郑刚,聂东清.天津软土地区深基坑多级支护结构变形的参数分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2018,31(1):47-53.

由表 1 可以看出,铁路正线区域的钢管柱 x, y 两个方向的垂直度偏差均 $\leq 1/1\ 000$;铁路非正线区域的钢管柱 x, y 两个方向的垂直度偏差均 $\leq 1/800$ 。

对已完工钢管柱垂直度偏差值进行回归方程的拟合可以为后续同条件下施工时,钢管柱 x, y 方向的偏差值进行预测,如图 5 所示, x, y 方向偏差值的回归方程为:

$$y_{x\text{向}} = 0.001\ 7x^6 - 0.039\ 4x^5 + 0.340\ 8x^4 - 1.433\ 1x^3 + 3.117\ 6x^2 - 3.044\ 1x + 4 \quad (4)$$

$$y_{y\text{向}} = 0.009\ 2x^6 - 0.248\ 1x^5 + 2.605\ 3x^4 - 13.456x^3 + 35.336x^2 - 43.408x + 23 \quad (5)$$

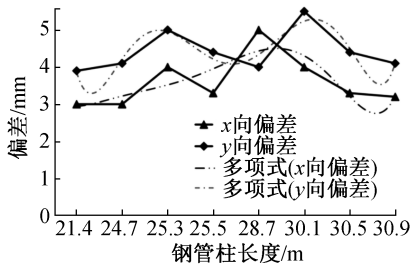


图 5 不同柱长的偏差值拟合方程

回归方程的判定系数均 > 0.5 , 分别为 x 向偏差 $R^2 = 0.661\ 5$, y 向偏差 $R^2 = 0.885\ 4$, 说明曲线拟合良好, 回归方程可靠, 能为后续不同长度钢管柱施工的垂直度预测提供依据。

5 结语

结合北京城市副中心站综合交通枢纽项目, 对钢管混凝土柱施工过程中高精度垂直度的控制要点总结如下。

1) 根据地质条件、钻孔深度进行施工设备的确定, 选用较为平稳且扭矩大的钻进成孔设备。

2) 进行施工平台水平度、成孔垂直度的控制, 可以为后续钢管柱施工时的垂直度控制提供保障。

3) 根据钢管柱所处介质的不同调整下插速度, 粉质黏土层、重粉质黏土层的下插速度为 83mm/s , 细砂层和中砂层的下插速度为 68mm/s , 水下 C35 混凝土内的下插速度为 50mm/s 。

4) 采用“勤监测、精调垂、内外同步”的施工方 案, 可满足钢管柱安装垂直度偏差 $\leq 1/1\ 000$ 的要求。

参考文献:

- [1] 宋廷涛. 盖挖逆作法深基坑施工关键技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2019(4): 109-112.
- [2] 杨学林, 周平槐. 逆作地下室设计中的若干关键问题[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 238-244.
- [3] 刘宝奎, 尚艳亮, 隆卫, 等. 城市繁华区大规模 T 形盖挖地铁车站基坑开挖出土技术研究[J]. 施工技术, 2020, 49(7): 9-12, 103.
- [4] 李强, 詹必雄, 吴宇, 等. 盖挖地铁车站深基坑土方开挖施工技术[J]. 施工技术, 2019, 48(19): 124-126.
- [5] 张晓冬. 盖挖逆作地铁车站后压浆 AM 桩竖向承载性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- [6] 未晓丽, 王文达. 地下工程中钢管混凝土柱施工关键技术[J]. 施工技术, 2013, 42(7): 27-29, 33.
- [7] 宋中华. 盖挖逆作车站永久钢管柱施工工法的研究与优化[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(10): 33-36.
- [8] 马瑶环, 凌涛. 盖挖逆作地铁车站钢管柱姿态控制技术[J]. 工程建设, 2021, 53(11): 56-61.
- [9] 陈维超, 黄伟, 张倚天, 等. 湖南旺旺医院(二期)“一柱一桩”中格构柱导向、定位、调垂施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(20): 104-106, 114.
- [10] 陈琦. 逆作法施工中一桩一柱的超高垂直精度控制方法[J]. 工程技术研究, 2020, 5(7): 24-25.
- [11] 陈隽峰. 高层建筑超厚底板大体积混凝土施工技术[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [12] 郑刚, 何晓佩, 周海祚, 等. 基坑斜-直交替支护桩工作机理分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 97-100.
- [13] 郑刚, 王玉萍, 程雪松, 等. 基坑倾斜桩支护性能及机理大型模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1581-1591.
- [14] 马雪兵, 余地华, 郑刚, 等. 深基坑前排倾斜双排桩设计与施工技术[J]. 施工技术, 2021, 50(7): 6-10.
- [15] 余地华, 田野, 张涛, 等. 无支撑前斜后直倾斜双排桩支护监测与分析[J]. 施工技术, 2021, 50(01): 57-61, 75.
- [16] 黄晓程, 张松波, 邓昌福, 等. 前排倾斜桩参数对双排桩支护效果影响分析[J]. 施工技术, 2020, 49(01): 29-32, 37.
- [17] 李松, 马娜, 郭运, 等. 双排桩与单排桩组合多级支护结构在深大基坑中的应用[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(5): 103-109.
- [18] 王恩钰, 周海祚, 郑刚, 等. 基坑倾斜支护的变形数值分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 44(S1): 73-76.
- [19] 孔德森, 张秋华, 史明臣. 基坑悬臂式倾斜支护桩受力特性数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 742-747.
- [20] 刁钰, 苏奕铭, 郑刚. 主动式斜直交替倾斜桩支护基坑数值研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 161-164.

(上接第 88 页)