



# 考虑前后缓冲区的地面锁站动态布置仿真分析\*

武彬<sup>1</sup>, 张凯<sup>1</sup>, 张煜<sup>2,3</sup>, 杨彩云<sup>2</sup>

(1. 天津港第二集装箱码头有限公司, 天津 300461;

2. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063; 3. 武汉理工大学韶关研究院, 广东 韶关 512100)

**摘要:** 针对考虑前后缓冲区的地面锁站布置问题, 在传统固定锁站布置方案的基础上, 提出一种锁站动态布置策略, 该策略能够根据船型尺寸动态调整锁站数量和位置, 以适应不同尺寸船舶作业需求。在对自动化码头集装箱解挂锁工艺流程分析的基础上, 使用 AnyLogic 软件构建考虑前后缓冲区的地面锁站动态布置仿真模型, 以系统作业效率、设备占用率及缓冲区排队长度为衡量指标, 评估锁站动态布置策略的实际性能。结果表明, 相较于传统的固定锁站布置方式, 地面锁站动态布置方案能够均衡各锁站负载及缓冲区的平均排队长度, 系统作业效率提高 14.6%。锁站动态布置方案提升了锁站整体利用率, 满足装卸船及水平运输作业要求。

**关键词:** 自动化集装箱码头; 集装箱锁站; 动态布置; 仿真建模

**中图分类号:** U 656.1<sup>+</sup>35; TP 391.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)06-0178-06

## Simulation analysis of dynamic layout of ground locking stations considering front and rear buffers

WU Bin<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>2,3</sup>, YANG Cai-yun<sup>2</sup>

(1. Tianjin Port Second Container Terminal Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

3. Shaoguan Research Institute of Wuhan University of Technology, Shaoguan 512100, China)

**Abstract:** For the layout problem of ground locking stations considering the front and rear buffers, we propose a dynamic layout strategy of locking stations based on the traditional plan of fixed locking station layout, which can dynamically adjust the number and position of locking stations according to the size of ships to adapt to the operation requirements. On the basis of analyzing the process of unloading containers in automated terminals, we use the software AnyLogic to build a simulation model for the dynamic layout of ground locking stations considering the front and rear buffers, and use the system operation efficiency, equipment occupancy rate, and buffer queue length as the measurement indicators to evaluate the actual performance of the dynamic layout strategy of locking stations. The results reveal that compared with the traditional fixed layout of locking stations, the dynamic layout of ground locking stations can balance the load of each lock station and the average queue length of buffers, and the system operation efficiency is increased by about 14.6%. The dynamic layout of lock stations can improve the overall utilization rate of locking stations and meet the requirements of loading and unloading ships and horizontal transportation operation.

**Keywords:** automated container terminal; container locking station; dynamic layout; simulation modeling

近年来, 集装箱码头作业设备的智能化和柔性化程度不断提高, 码头的建设和发展需要适应集装箱船舶大型化、高效率、节能环保等新要求。

传统集装箱码头存在大量固定布置的作业设备, 设备综合利用率较低, 严重制约集装箱装卸及水平运输效率。自动化集装箱码头应根据作业情

收稿日期: 2021-09-20

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(72174160)

作者简介: 武彬(1985—), 男, 高级工程师, 从事码头智慧作业设备运营维护及设计、集装箱码头作业系统管理。

况动态布置各类设备,这样才能加快集装箱进出港流程,提高港口整体作业效率。

在以往的文献中包含了大量关于自动化码头总体布局的研究,如周鹏飞等<sup>[1]</sup>建立一种高架轨道式自动化码头系统仿真模型,改进了自动化集装箱码头的装卸工艺,与传统系统相比,该系统的船舶装卸时间缩短约6%,节约了码头资源;高延辉等<sup>[2]</sup>提出一种水平布置的双回字形码头工艺布局,具有自动化程度高、作业效率高、节能环保等优点,为自动化集装箱码头装卸工艺的发展提供了新思路;Roy等<sup>[3]</sup>首次尝试建立考虑码头、运输工具和堆场的集装箱码头集成模型,通过仿真试验输出数据与真实码头数据进行对比,验证了该模型的有效性。

除此之外,研究人员在自动化集装箱码头水平运输设备的配置和调度方面也进行了深入研究,如秦悦<sup>[4]</sup>基于离散事件系统规范(discrete event system specifications,DEVS)构建集装箱码头装卸作业系统数学模型,通过将仿真试验的输出数据与实际码头数据进行比较,验证了所构建模型的正确性和有效性;陈欢<sup>[5]</sup>利用AnyLogic软件建立场桥作业调度的仿真模型,并设计3种基于贪婪算法的场桥调度算法求解该模型,得出了合理场桥利用率下须配置的场桥数量,对实际作业有良好的指导作用;刘广红等<sup>[6]</sup>针对自动化集装箱码头提出一种码头前

方中转平台的布置方案,能够很好地解决岸桥和自动导引车(automated guided vehicle,AGV)之间作业的耦合和拆装集装箱锁销问题。

通过以上研究可知,对于集装箱港口的研究大多集中在场桥、岸桥等大型设备的调度和配置上,对于地面锁站及其缓冲区智能配置的研究较少。在传统的岸边集装箱装卸船流程中,每台岸桥下配备固定数量的锁站,负责对集卡上等待装船的集装箱安装连接锁,或者对刚卸下船的集装箱进行连接锁拆卸作业。在实际工作中,随着集装箱装卸量的增加,传统固定布置方案无法适应船舶尺寸差异,造成锁站负载过高或过低,损耗的时间成本也相应增加,降低生产效率。为提高集装箱码头装卸船效率及设备利用率,需要定义并开发一种考虑前置和后置缓冲区的地面锁站动态布置方案。

本文在分析自动化码头集装箱锁站解挂锁工艺流程的基础上,应用AnyLogic软件构建考虑前后缓冲的地面锁站动态布置仿真模型,通过对传统布置方案与动态布置方案的输出结果进行对比分析,为相关决策提供建议。

1 考虑前后缓冲区的地面锁站动态布置方法

自动化码头岸边锁站系统如图1所示,主要包括地面锁站、前置缓冲区、后置缓冲区。

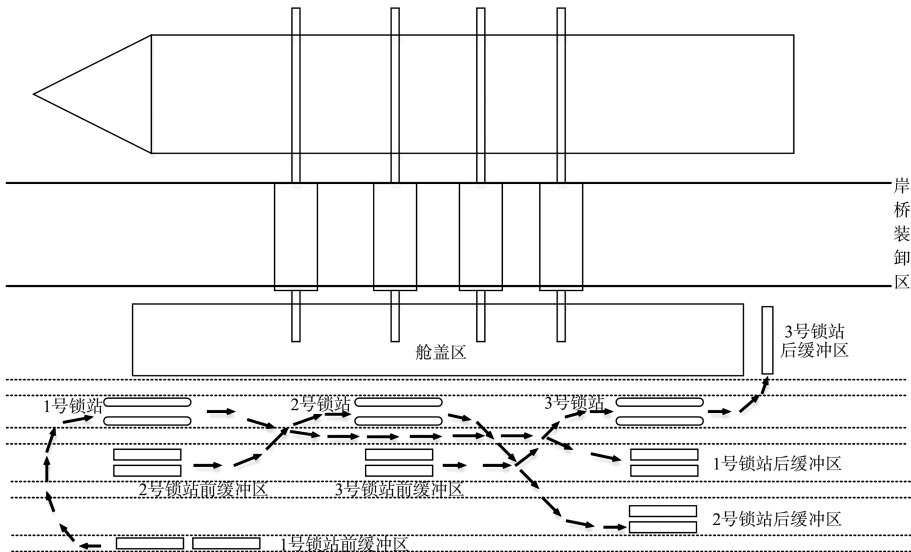


图1 自动化码头岸边锁站系统

在系统中，地面锁站位于舱盖区下方，锁站与舱盖摆放区之间有一条宽 3.5 m 的通道，用于操作员和摆放锁盒子的叉车穿行。锁站由 4 个可移动解锁岛组成，可以停放一辆智能运输机器人 (artificial intelligence robot of transportation, ART) 进行解挂锁作业，两座锁站之间规定间隔 55 m，锁站长度为 20 m，船首与首锁站的间隔、船尾与尾锁站的间隔均为 35 m；前缓冲区用于 ART 在进锁站之前调整装船次序或等待空闲锁站，当前解锁站的前缓冲区位于船首方向 (进锁站反方向) 的上一个锁站缓冲区下方，船首方向第一个锁站的前缓冲区位于掉头前的位置；后缓冲区用于在锁站后调整装船次序，此时已经完成解挂锁，等待进入岸桥下作业等待位；当前解锁站的后缓冲区位于船尾方向 (进锁站反方向) 的后两个锁站缓冲区下方，船尾方向第一个锁站的后缓冲区位于垂直岸线的舱盖摆放区平行位置，位于 ART 驶往岸桥的道路上。

基于上述地面锁站系统布局，岸边集装箱作业解锁工艺流程如下：岸桥从船舶抓取集装箱放于 ART 上→分配锁站后载箱 ART 前往对应锁站前缓冲区→锁站空闲后 ART 进入锁站完成解锁作业→解锁作业完成后进入后缓冲区。在挂锁作业中，ART 在堆场取箱后，前往锁站区进行挂锁作业，作业完成后进入岸桥区域，岸桥从 ART 抓取集装箱放于船舶上。

根据前文所述的锁站布局、解挂锁工艺流程以及船型尺寸  $d$ ，对锁站数量  $m$  进行计算，公式为：

$$m=\frac{(d-c-b)}{(b+a)}\tag{1}$$

式中： $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别为锁站规定间隔、锁站长度、船首尾与首尾锁站间隔、船舶长度。计算结果向下取整。同时，设置锁站布置数量满足岸桥

作业需求为最高优先级，岸桥与锁站数量大致满足 1.5:1 的配置比例。

2 锁站动态布置仿真模型

考虑前后缓冲区的自动化码头岸边锁站系统为一个典型的离散事件<sup>[7]</sup>物流系统，而 AnyLogic<sup>[8]</sup>为一个面向对象的图形化仿真软件平台，对于解决大规模港口物流系统仿真问题具有很强的适用性。本文应用 Anylogic 构建考虑前后缓冲区的自动化码头岸边锁站仿真系统，实现对地面锁站动态布置的模拟。在输入的基本参数一定的情况下，设计 2 种方案并获得不同方案下的输出数据，以此为基础分析考虑前后缓冲区的地面锁站系统的动态性能。

本文对比分析地面锁站动态布置方法与传统的固定锁站布置方法的作业性能，针对考虑前后缓冲区的的地面锁站动态布置系统各对象要素的特点对锁站、各设备实体及作业流程进行合理简化，选择的主要仿真单元见表 1；建立的仿真模型见图 2；仿真流程见图 3。

表 1 仿真模型采用的主要仿真单元

对象名称	主要功能
source	模拟作业任务的产生，用于生成待处理集装箱
seize	抓取资源池中空闲资源
resource pool	资源池模块，用于表示岸桥、ART 及锁站资源
queue	队列单元，模拟作业中的排队情况
move to	移动模块，用于模拟 ART 的运动
delay	延迟单元，模拟解锁作业过程
sink	销毁单元，模拟任务结束
select output	选择单元，模拟 ART 选择不同锁站
exit	离开单元，模拟 ART 单次任务结束
restricted area start	限制单元，模拟缓冲区容量限制
release	释放资源，用于单次作业完成将资源状态转为空闲

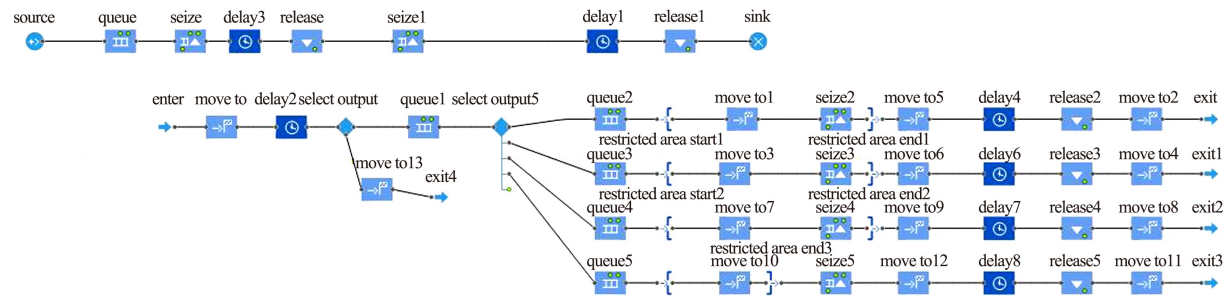


图 2 仿真模型界面

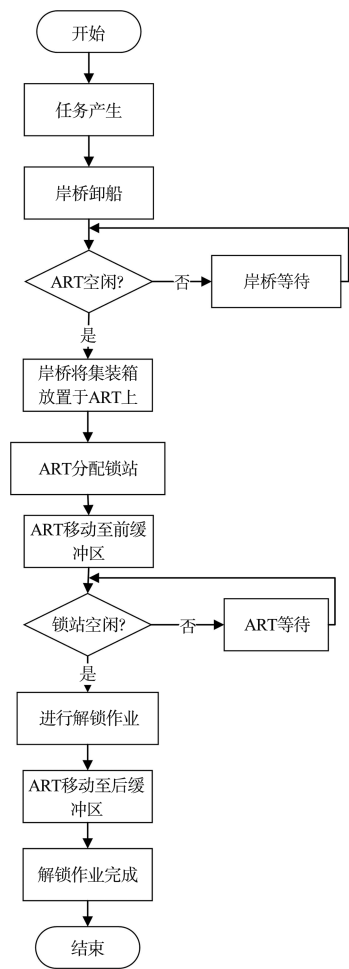


图 3 仿真流程

主要仿真事件实现如下：

1)岸桥作业仿真。采用发生器 source 模块，根据历史作业数据设定任务到达时间分布，采用资源池 resource pool 模块设置岸桥数量及布置位置。任务产生后，从资源池列表中获得空闲岸桥资源，采用时间延迟模块 delay 对岸桥装卸船作业过程进行简化模拟，单个集装箱作业完成后释放岸桥资源，岸桥状态由忙碌转为空闲。

2)ART 作业仿真。卸船任务产生后 seize 模块抓取空闲 ART 到达岸桥进行卸船作业，岸桥将集装箱放置到 ART 上，采用 setspeed 函数对载箱 ART 速度进行调整，移动模块 move to 控制 ART 在作业区域的运动。分配锁站后，ART 载箱前往锁站区域进行解挂锁作业。

3)解锁作业仿真。在仿真面板中利用矩形节点 node 标记缓冲区及锁站位置，ART 在分配锁站后前往锁站对应前缓冲区。同样采用资源池控制锁站资源，若锁站空闲则 ART 进入锁站进行解锁作业，若锁站处于作业状态则在前缓冲区等待，其中前缓冲区最大容量限制为 4 辆 ART，设置队列 queue 容量限制为 4。

3 仿真与分析

3.1 仿真模型基本参数

根据某 20 万吨级码头实际布局，岸线长度 1 100 m，布置 3 个顺岸式泊位。以 3 艘船舶同时作业为仿真场景，其中 2 艘 10 万吨级船舶、1 艘 5 万吨级船舶。

在传统固定布置方案下，无论船型吨级，锁站位置及数量均为固定值，沿岸线布置 9 个锁站，每艘船分配 3 个锁站。该固定布置方案不考虑船型尺寸，往往导致锁站利用率不合理，且在大型船舶到港时易产生缓冲区拥堵情况。动态布置方案则是根据到港船舶尺寸确定锁站数量，从而均衡作业量与设备数量之间的关系。由地面锁站动态布置方法(式(1)) 计算各船分配锁站数量及布置位置，可得 2 艘 10 万吨级船舶配备 4 个锁站、5 万吨级船舶配备 3 个锁站。



系统主要设施设备参数为：岸线长度 1 100 m，堆场纵深 600 m，岸桥 14 台，集卡 60 台，岸桥单次作业时间 3 min，场桥单次作业时间为 102、144、216 s(三角分布)，ART 最大、平均行驶速度分别为 35、20 km/h，锁站单次作业时间2.5 min。其中岸桥设备单次作业时间及车辆行驶速度根据历史作业数据确定。

基于以上设备参数及布置方案，在仿真模型中 2 种方案均设置仿真时间为 10 h，收集各项仿真系统输出数据，具体包括：每小时完成集装箱数量、锁站及 ART 等设备占用率、锁站前缓冲区排队长度。

3.2 仿真试验分析

为了分析不同锁站布置方案对码头作业性能的影响，设计两组方案：方案 A 为锁站及缓冲区传统固定布置方案，锁站数量固定为 9，沿岸线均匀分布；方案 B 则根据船型尺寸计算所需锁站数量。设置仿真时间为 3 h，为比较不同方案下码头作业性能，仿真输出数据为每小时处理集装箱数量、锁站、ART 设备占用率及锁站缓冲区排队长度。2 种锁站布置方案的仿真结果见表 2。

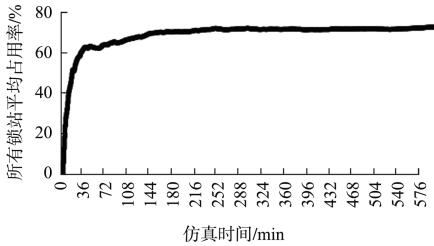
表 2 两种锁站布置方案的仿真结果

布置方案	锁站数量			每小时完成箱数量
	10 万吨级	5 万吨级	10 万吨级	
静态布置	3	3	3	191
动态布置	4	3	4	219

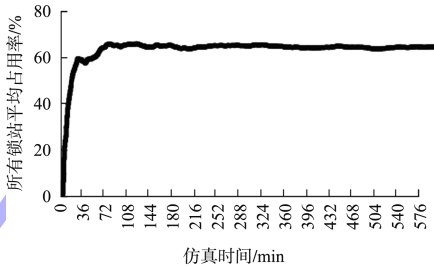
由表 2 可看出，动态布置方案较传统固定布置方案在 10 万吨级船舶的锁站布置数量上增加了 1 套；同时动态布置方案较传统固定布置方案的每小时完成集装箱数提高了 14.6%，显著提升了码头的装卸船作业效率。

传统固定式布置方案和动态布置方案下的锁站占用率见图 4。可以看出，与传统固定式布置方案相比，动态布置方案的资源占用率略有下降，静态布置方案锁站占用率最高为 71%，动态锁站布置方案锁站占用率最高为 65%，适当降低

了各锁站的作业负载，同时提高码头解锁作业能力。



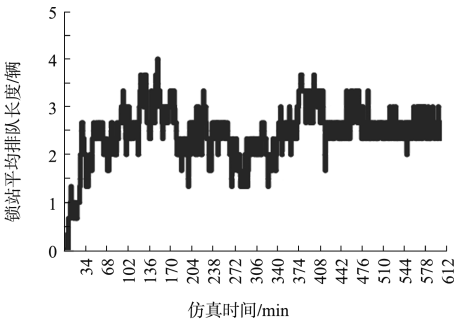
a) 固定式布置方案



b) 动态布置方案

图 4 锁站占用率

传统布置方案下锁站缓冲区平均排队长度见图 5a)。可以看出，在传统布置方案中，锁站平均排队长度达到锁站缓冲区容量限制(4 辆 ART)，表明传统固定式布置下的锁站配置数量不能满足大型船舶的作业需求。动态布置方案下锁站缓冲区平均排队长度见图 5b)。可以看出，与传统固定布置方案相比，锁站平均排队长度降低 80.3%，这是由于在动态布置方案下，锁站数量根据作业船舶尺寸确定，能够较好地适应不同尺寸船舶的作业需求，从而在保证作业能力的前提下，降低各锁站的交通压力，避免缓冲区 ART 的交通拥堵和等待时间过长等问题。



a) 固定式布置方案

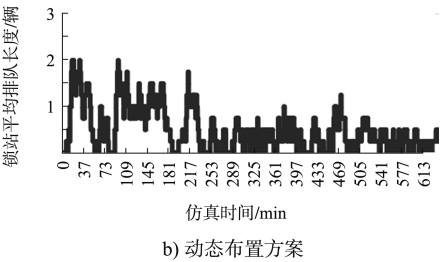


图 5 锁站平均排队长度

4 结语

1) 本文基于 AnyLogic 仿真软件, 在分析自动化码头集装箱解挂锁工艺流程的基础上, 构建出考虑前后缓冲区的地面锁站动态布置仿真模型。

2) 动态布置方案能够根据船型尺寸动态确定锁站数量, 具有较高的灵活性。在相同的岸桥、ART 及其他堆场资源条件下, 相较于固定布置方案, 采用锁站动态布置方案能将系统作业效率平均提高 14.6%。

3) 动态布置方案能够在满足作业需求的前提下, 降低锁站的占用率及锁站作业区域拥堵情况, 缓解各缓冲区的交通压力。

参考文献:

[1] 周鹏飞, 李玉登, 范璐璐, 等. 高架轨道式自动化集装箱码头仿真建模与分析[J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(4): 20-25.

[2] 高延辉, 魏世桥, 周强, 等. 基于双轨轮小车与双回字形平面布置的集装箱码头新工艺[J]. 港口装卸, 2015(4): 43-47.

[3] ROY D, KOSTER R B M. Modeling and design of container terminal operations[J]. Operations research, 2020, 68(3): 686-715.

[4] 秦悦. 集装箱码头物流系统建模方法研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.

[5] 陈欢. 集装箱场桥调度及其仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

[6] 刘广红, 程泽坤, 林浩. 自动化集装箱码头总体布置[J]. 水运工程, 2013(10): 73-78.

[1] RUSGIYARTO F, SJAFRUDDIN A, FRAZILA R B, et al. Discrete event simulation model for external yard choice of import container terminal in a port buffer area[J]. AIP conference proceedings, 2017, 1855(1): 040014.

[7] 刘亮, 陈永刚. 复杂系统仿真的 AnyLogic 实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019. (本文编辑 王璁)

(上接第 177 页)

[4] 王元站. 港口与海岸水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

[5] 刘敏. 进度控制[M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2013.

[6] 张建平, 余芳强, 赵文忠, 等. BIM 技术在邢汾高速公路工程建设中的研究和应用[J]. 施工技术, 2014, 43(18): 92-96.

[7] 林佳瑞, 张建平. 基于 BIM 的施工资源配置仿真模型自动生成及应用[J]. 施工技术, 2016, 45(18): 1-6.

[8] 王永泉, 黄亚钟, 韦芳芳, 等. 基于 BIM 和遗传算法的网架工程施工进度-费用优化研究[J]. 施工技术, 2020, 49(6): 18-22, 66.

[9] 毕磊, 于水, 丁琼, 等. 基于 5D-BIM 的高桩码头工程施工进度-成本实时控制[J]. 水运工程, 2017(3): 189-193.

[10] 吴遵奇, 段昶, 黄睿奕, 等. BIM 技术在复杂码头结构施工可视化进度管理中的应用[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(7): 22-26.

[11] 王帅, 杨林虎, 蔡伟. EPC 模式下海外自动化集装箱码

头工程 BIM 技术应用[J]. 水运工程, 2021(10): 323-327.

[12] SUN J, LIU J, XU W B. QPSO-based QoS multicast routing algorithm[C] // WANG T D, LI X D, CHEN S H, et al. Simulated Evolution and Learning 6th International Conference Proceedings. Berlin: Springer, 2006: 261-268.

[13] 孙俊. 量子行为粒子群优化算法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.

[14] 王杨阳. BIM 技术在建筑工程成本控制中的研究: 以黄石港码头工程为例[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.

[15] 项贻强, 竺盛, 赵阳. 快速施工桥梁的研究进展[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 1-27.

[16] 黄恩代, 陈立. 陆上吊装工艺在码头施工中的应用[J]. 中国港湾建设, 2005(4): 46-49.

[17] 缪晨辉, 曾晖, 王晓光. 高桩码头构件吊装新技术[J]. 水运工程, 2016(2): 176-180.

(本文编辑 王璁)