

塞拉利昂海域雨季深海声学散射层 生物垂直迁移现象分析

屈泰春¹, 冯春雷^{1,2}, 李灵智^{1,2}, 范瑞良², 邵盛男¹, 张志超¹

(1. 中国水产科学研究院海洋捕捞工程技术研究中心, 上海 200090; 2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090)

摘 要:应用 2021 年 5 月西北非塞拉利昂海域中上层渔业资源与环境调查的船载 Simrad EK60 科学渔探仪(38 kHz)数据,对深海声学散射层生物的垂直迁移过程和迁移量进行分析研究。结果表明:EK60 探测范围内,277 ~ 563 m 水层存在深海声学散射层;该层部分生物日落时分上升、日出时分下降,上升和下降活动持续时间均约为 3.10 h;迁移活动以变速运动形式分 2 ~ 5 层进行,且迁移中会发生层间的分离与聚合现象;净垂直下降速率均值为 $4.30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,大于净垂直上升速率均值 $3.41 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;上升后,深海声学散射层内 NASC 值减少 62.63% ~ 92.70%,绝大部分进入 96 m 以浅的浅水层中;下降后,深海声学散射层内 NASC 值增加 45.59% ~ 79.79%,占浅水层内减少 NASC 值的 32.71% ~ 98.67%。

关键词:昼夜垂直迁移;深海声学散射层;塞拉利昂海域;Simrad EK60;渔业声学

中图分类号: S 931 文献标志码: A

海洋水体,根据深度在垂向上可分为上层带(epipelagic zone, 0 ~ 200 m)、中层带(mesopelagic zone, 200 ~ 1 000 m)、深层带(bathypelagic zone, 1 000 ~ 4 000 m)、深渊层带(abyssopelagic zone, 4 000 ~ 6 000 m)和远洋海底带(hadopelagic zone, > 6 000 m)^[1]。伴随日出日落,中层带与上层带之间重复上演着地球上规模最大的生物昼夜垂直迁移运动(diel vertical migration, DVM)^[2]。日落时分,海洋生物由约 300 ~ 850 m 的中层带上升至 < 200 m 的上层带捕食,日出时分再下降到初始水层^[3]。由于此生物层由声学探测设备发现,因此被称为深海声学散射层(deep scattering layers, DSL 或 DSLs)。

DSL 最早于 1942 年在太平洋被发现^[4]。随后的调查表明,世界各大洋均有 DSL 的分布^[5-7],是中层带的一个普遍特征^[8]。DSL 生物

由大洋中层鱼类(mesopelagic fishes),主要是灯笼鱼科(Myctophids)或圆罩鱼属(Cyclothone)鱼类,以及小鱿鱼、小虾和胶质浮游生物(gelatinous plankton)集群等组成^[5]。中层带占据了约 20% 的海洋水体^[9],其中很可能蕴藏着最大的海洋生物量^[6]。DSL 生物,特别是其中的游泳动物(micronekton)是食物网中连接浮游生物(zooplankton)和顶级捕食物种的关键纽带^[5],是生物碳循环(biological carbon pump, BCP)的一个重要环节^[6, 10-11]。同时,DSL 生物的活动规律和空间分布被认为与大尺度的环境条件有关^[9]。因此,对 DSL 的探测可作为海洋相关学科研究和海洋环境监测的一种方法^[4]。

塞拉利昂海域属于热带海域,位于东大西洋三大强烈涌升流区域之一的毛里塔尼亚(Mauritania)涌升流势力范围以南,以高初级生产

作者简介：屈泰春(1988—)，男，蒙古族，内蒙古通辽人，助理研究员，主要从事渔业声学、渔业资源和渔具渔法研究。E-mail: qtc8810@ 163. com

通信作者：冯春雷，副研究员。E-mail:fengcl@ ecsf. ac. cn, Tel:021-65810264

力著称^[12],其专属经济区(exclusive economic zone, EEZ)面积 104 850 km²,渔业资源丰富^[13]。1963—1974 年间,由海洋学家 RICHARD 主持的 WHOI(Woods Hole Oceanographic Institution)项目的主要目标为发现大西洋中层鱼类分布与 DSL 之间的关系^[12],调查范围遍及整个大西洋以及部分与大西洋毗邻的北冰洋海域。该项调查共进行了 1 040 次中层拖网,但在塞拉利昂海域附近仅实施了一个网次拖网,调查强度极低,不足以了解该海域 DSL 的组成和时空分布规律。此后,鲜见针对该海域 DSL 的报道。塞拉利昂海域 DSL 的研究有助于对中东大西洋生物碳循环规律的认知和海洋环境的监测,也对该海域渔业资源形成和发展的相关研究具有重要意义。本文利用 2021 年 5 月于塞拉利昂海域中上层渔业资源与环境调查中获取的船载 Simrad EK60 科学渔探仪(38 kHz)声学数据,对该海域 DSL 生物的垂直迁移过程和迁移量进行分析研究,以期为该海域 DSL 组成和分布规律提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

原始声学数据于 2021 年 5 月 1 日—5 月 8

日西非塞拉利昂中上层渔业资源与环境调查时采集(图 1)。声学探测设备为船载 Simrad EK60 型分裂式波束科学渔探仪,于 4 月 22 日在调查海域(8°30'06"N、13°34'17"W)进行校准^[14]。38 kHz 声学换能器发射功率 2 kW,数据采集最大水深 1 km,声脉冲收发间隔 1 s。

选取走航中^[4, 15]底深大于 800 m、垂直迁移前后 1.5 h 内的 38 kHz 声学数据进行分析,共有 12 段声学数据适用于垂直迁移现象的研究(表 1)。但 5 月 4 日上升区域 R4 站位数据质量较差,未被采用;因此,共有 6 段上升和 5 段下降的可用数据。

1.2 数据处理软件

Echoview[®] (V8.0)软件用于对声学数据进行处理, MATLAB(R2016a)用于对 Echoview 导出的数据做进一步处理, Surfer 16 用于部分图形的制作。

1.3 数据处理

1.3.1 声学数据预处理

首先,提取、剔除原始声学数据的背景噪声(background noise, BN)^[16-17],重采样间隔为 20 Pings × 5 m;之后手动剔除表层盲区、泡沫、海底回波及其他混响数据;最后,根据回波映像结合

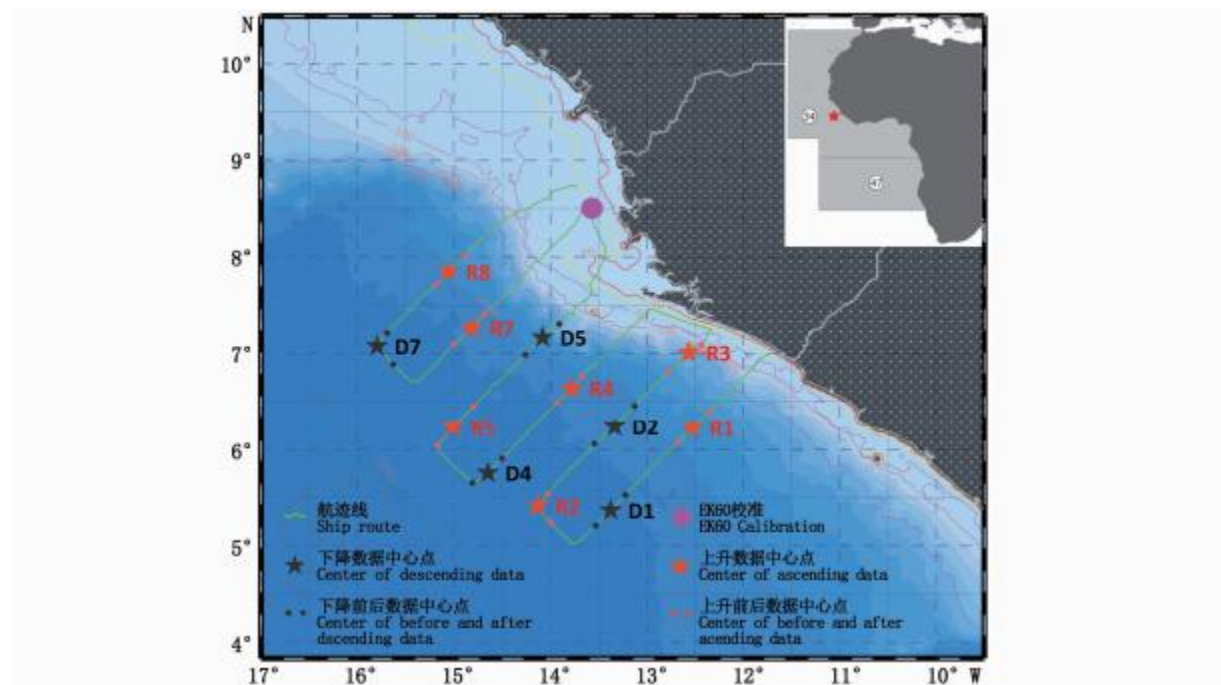


图 1 调查海域及研究数据选取位置

Fig. 1 Survey area and locations of data used

注：D 代表下降数据，R 代表上升数据

Note: D is for descending data and R is for ascending data

表 1 适用于垂直迁移现象研究的原始声学数据时段

Tab. 1 Raw acoustic data suitable for the analysis of diel vertical migrations

序号 Number	分类 Sort	区域 Region	起始时间 Start time	结束时间 End time	持续时长/h Duration
1		R1	2021/05/01 15 : 20 : 49	2021/05/01 21 : 00 : 27	5.66
2		R2	2021/05/02 15 : 43 : 04	2021/05/02 21 : 02 : 10	5.32
3		R3	2021/05/03 15 : 06 : 14	2021/05/03 20 : 29 : 03	5.38
4	上升数据 Ascending data	R4 *	2021/05/04 16 : 30 : 17	2021/05/04 21 : 09 : 08	4.65
5		R5	2021/05/05 14 : 49 : 04	2021/05/05 21 : 10 : 04	6.35
6		R7	2021/05/07 15 : 25 : 59	2021/05/07 21 : 05 : 01	5.65
7		R8	2021/05/08 15 : 52 : 05	2021/05/08 21 : 18 : 08	5.43
8		D1	2021/05/02 04 : 17 : 10	2021/05/02 09 : 52 : 36	5.59
9		D2	2021/05/03 03 : 14 : 09	2021/05/03 10 : 40 : 20	7.44
10	下降数据 Descending data	D4	2021/05/05 04 : 44 : 59	2021/05/05 10 : 29 : 59	5.75
11		D5	2021/05/06 04 : 14 : 02	2021/05/06 10 : 10 : 01	5.93
12		D7	2021/05/08 04 : 36 : 03	2021/05/08 10 : 01 : 46	5.43

注：*表示数据质量太差，不用于本研究

Note : * means data of poor quality and not used in this study

与原始深度时间曲线相差过大时，使用原始深度时间曲线求得迁移活动的相关统计数据。

DSL 生物的垂直迁移特征，将研究水体由上到下依次划分为浅水层 (shallow layer, SL)、中间层 (middle layer, ML) 和深海声学散射水层 (deep scattering layer, DSL)3 个水层。

1.3.2 迁移速率的计算

采用净垂直速率 (net vertical velocity, NVV)^[18] 表征 DSL 生物的迁移速率，即迁移速度在垂向上分量的绝对值，通过对迁移生物层的深度时间曲线求导获得。

首先，应用 Echoview 软件中可编辑线及相关位图运算模块，依据视觉辨别，粗略提取出迁移回波信号，回波信号分层的则分别提取。在提取出的各层回波信号范围内先后使用最大 Sv 拾取器 (maximum Sv line pick) 和平滑滤波器 (smoothing filter)功能模块，即可获得各迁移生物层的原始深度时间曲线。

然后，应用 MATLAB 软件中的经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 工具箱^[19 - 20]对原始深度时间曲线进行分解，对最后一个本征模函数 (intrinsic mode function, IMF) 求导得出迁移速率。当 EMD 最后一个本征模函数

1.3.3 迁移量的计算

由于较难确定迁徙生物的物种组成，所以无法给出直观的迁移生物资源量。但由于 NASC (nautical area scattering coefficient) 值与生物量呈线性关系^[8]，所以本文采用各水层生物迁移前、后 1.5 h 至 0.5 h 之间的 1 h 时间段内 NASC 值的变化代表对应水层生物量的变化。

2 结果与分析

2.1 声学数据预处理

依据声学数据预处理后的回波图 (图 2) 和迁移生物分布规律，将水体划分为 11 ~ 96 m 的浅水层(SL)、96 ~ 277 m 的中间层(ML) 和 277 ~ 563 m 的深海声学散射层(DSL) (图 3)。

2.2 迁移速率

迁移生物日落时分上升，日出时分下降，且分层进行 (图 4)。各采样点生物分层数量和迁移规律存在差异。本文共获得 38 个生物分层，即 38 条深度时间曲线。6 个上升区域曲线数量 2 ~ 4 条，共 20 条，平均每个区域 3.3 条；5 个下降区域曲线数量 2 ~ 5 条，共 18 条，平均每个区域 3.6 条 (表 2)。

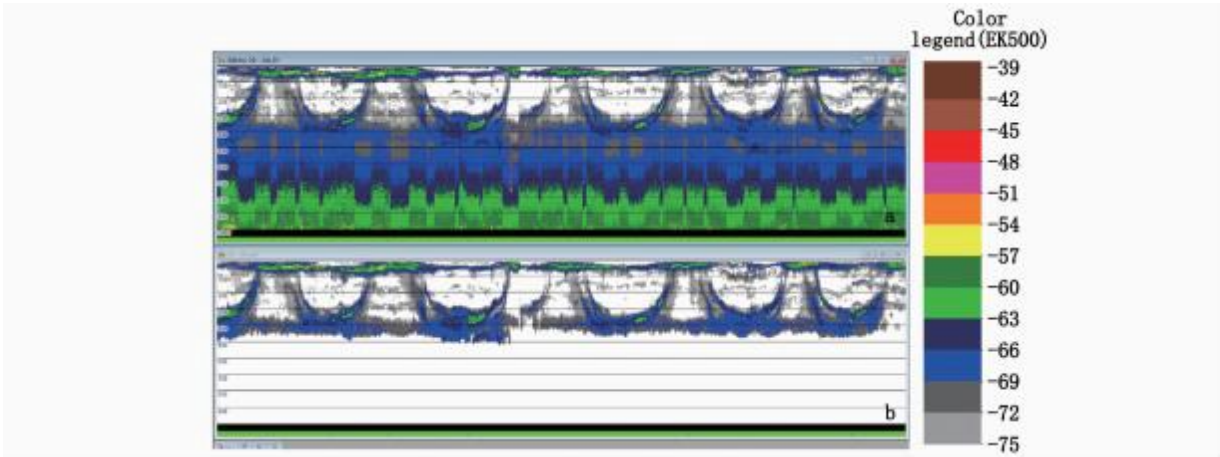


图 2 声学数据预处理前(a) , 后(b)对比图

Fig. 2 Contrast figure between before (a) and after (b) process of raw acoustic data
注：为了便于展示，进行了 100 Pings ×200 dataPoints 重采样

Note: resampled by 100 Pings ×200 dataPoints for convenience of presentation

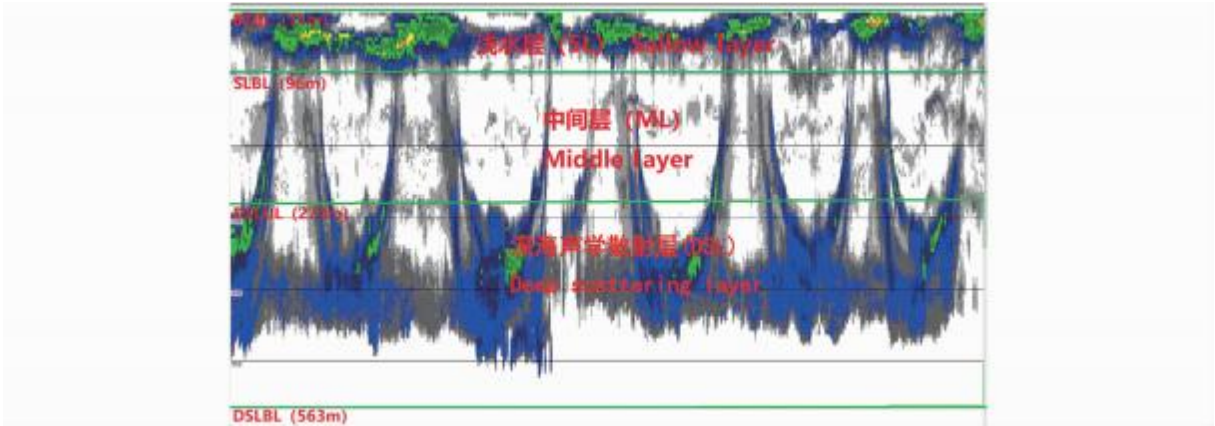


图 3 水层和边界线的定义

Fig. 3 Definition of layers and their boundary lines

注：底图为剔除背景噪声后的回波图

Note: the base figure is echogram after removing BN

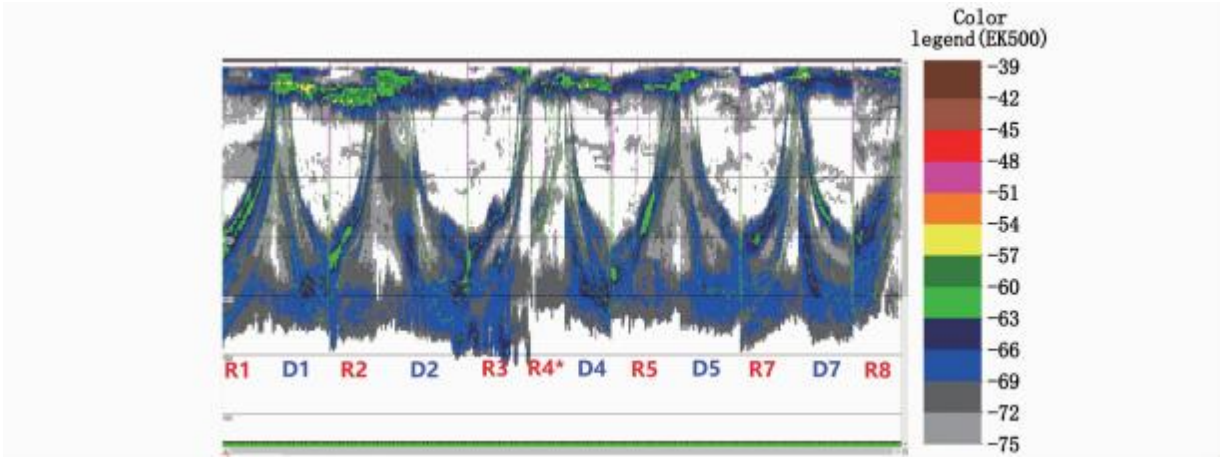


图 4 Echoview 软件中获得的垂直迁移原始深度时间曲线 (绿色)

Fig. 4 Raw depth-time curves (green) acquired by Echoview

迁移速率集中分布在 $0 \sim 7.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 上升速率峰值位置($1.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 小于下降速率峰值位置($2.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) (图 5)。

各层生物上升开始时间介于 $16:33 \sim 17:31$, 约 0.97 h ; 结束时间介于 $19:26 \sim 19:39$, 约 0.21 h ; 上升持续时长介于 $1.95 \sim 3.10 \text{ h}$, 上升速率均值为 $3.41 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 3)。

各层生物下降开始时间介于 $5:47 \sim 6:18$, 约 0.51 h ; 结束时间介于 $6:43 \sim 8:53$, 约 2.18 h ;

下降持续时长介于 $1.98 \sim 3.06 \text{ h}$; 下降速率均值为 $4.30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 4)。

将上升或下降的所有生物层的 NVV 按 1 m 间隔水层统计算术平均值, 即得 1 m 间隔水层平均迁移速率 (图 6)。结果表明, 200 m 以浅, 上升和下降的各水层平均迁移速率相差较小且明显大于 200 m 以深的水层; 200 m 以深, 下降的各水层平均迁移速率远大于上升的。

表 2 各数据区域迁移曲线数量
Tab.2 Number of depth-time curves in each region

序号 Number	分类 Sort	区域 Region	曲线数量 Number of curves	序号 Number	分类 Sort	区域 Region	曲线数量 Number of curves
1	上升数据 Ascending data	R1	4	7	下降数据 Descending data	D1	5
2		R2	3	8		D2	4
3		R3	3	9		D4	4
4		R5	4	10		D5	2
5		R7	4	11		D7	3
6		R8	2	合计 Total		5 个区域	18
合计 Total		6 个区域	20				

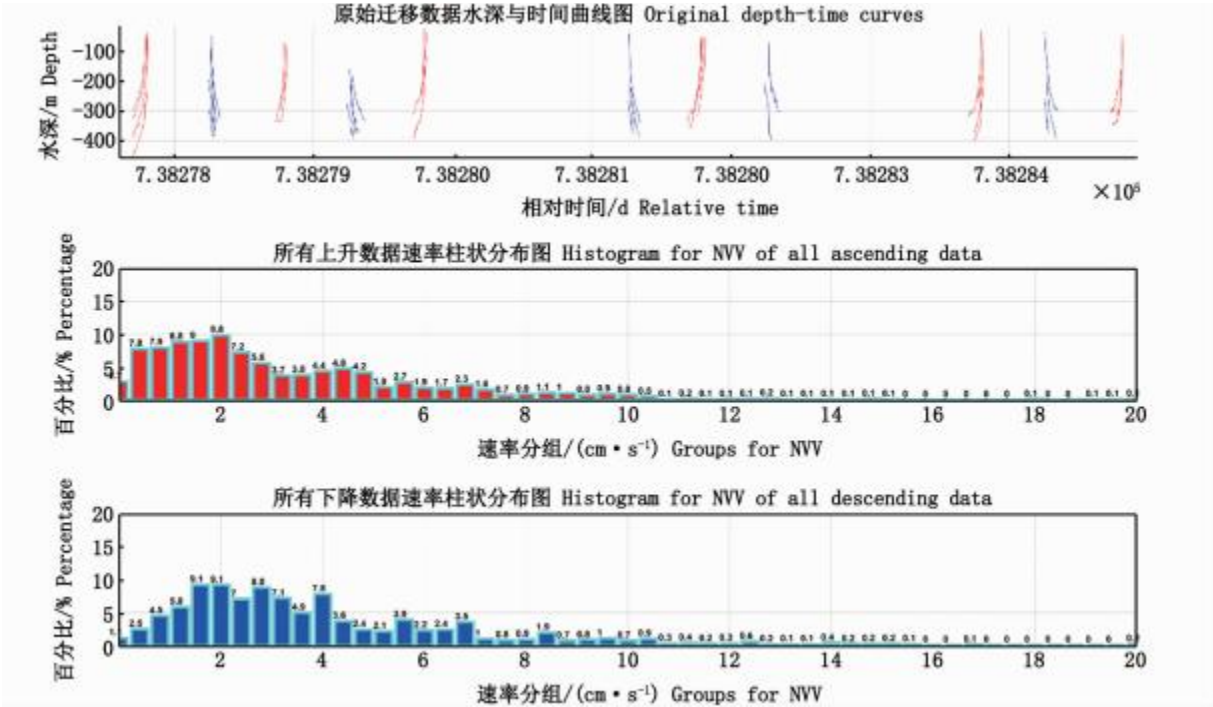


图 5 原始深度-时间曲线图和迁移速率柱状分布图

Fig. 5 Original depth-time curves and net vertical migration rate histogram by MATLAB

表 3 各生物分层上升参数汇总

Tab. 3 Summary of ascending parameters for biological stratifications

序号 Number	区域 Region	编号 Label	开始时间 Start time	持续时长 /h Duration	最大深度 /m Maximum depth	深度跨度 /m Depth span	最大速率 /(cm·s ⁻¹) Maximum NVV	速率均值 /(cm·s ⁻¹) Average NVV	平均速度 /(cm·s ⁻¹) Average speed
1	R1	1	16:53	2.28	-300.72	253.13	15.17	3.21	3.08
2	R1	2	16:53	2.45	-325.30	287.17	9.69	2.91	3.26
3	R1	3	16:53	2.55	-388.61	331.41	4.81	2.92	3.61
4	R1	4	16:53	2.42	-453.60	219.04	5.74	2.24	2.51
小计 Subtotal	R1	-	16:53	2.55	-453.60	415.47	15.17	2.82	3.12
5	R2	1	17:31	1.52	-338.07	265.88	24.98	4.90	4.85
6	R2	2	17:31	1.89	-338.07	251.56	15.04	3.71	3.69
7	R2	3	17:56	1.53	-338.07	171.96	2.21	1.65	3.12
小计 Subtotal	R2	-	17:31	1.95	-338.04	265.88	24.98	3.42	3.89
8	R3	1	17:17	1.85	-338.07	284.90	9.10	5.02	4.28
9	R3	2	17:17	2.21	-311.96	274.02	7.18	3.05	3.44
10	R3	2	17:18	2.18	-311.96	272.18	10.29	3.41	3.47
小计 Subtotal	R3	3	17:17	2.21	-311.96	364.89	10.29	3.83	3.73
11	R5	-	16:33	2.33	-391.95	292.72	19.51	3.82	3.49
12	R5	1	16:33	2.50	-391.95	285.18	6.81	4.73	3.17
13	R5	2	16:55	2.44	-345.29	304.47	8.33	3.29	3.46
14	R5	3	18:17	1.36	-345.29	266.52	12.84	5.03	5.43
小计 Subtotal	R5	4	16:33	3.10	-361.40	309.83	19.51	4.22	3.89
15	R7	-	17:00	2.31	-318.09	292.94	10.37	3.40	3.53
16	R7	1	17:00	2.50	-318.09	257.63	10.16	2.47	2.86
17	R7	2	17:53	1.61	-361.40	208.25	5.86	3.31	3.60
18	R7	3	17:59	1.44	-322.17	181.74	8.98	3.12	3.50
小计 Subtotal	R7	4	17:00	2.50	-322.17	373.83	10.37	3.08	3.37
19	R8	-	17:26	2.17	-371.41	264.77	4.79	3.36	3.39
20	R8	-	17:53	1.62	-403.06	251.05	7.24	2.63	4.30
小计 Subtotal	R8	1	17:26	2.17	-403.06	306.58	7.24	3.00	3.85
合计 Total	-	2	16:33	3.10	-403.06	426.54	24.98	3.41	3.60
		-			-307.90				
		-			-349.71				
		-			-349.71				
		-			-453.60				

注：除特别注释，速率值的计算均是根据原始深度时间曲线的 EMD 分解得到的最后一个 IMF 曲线计算得出，其他统计数据来自原始深度时间数据；速率均值为速率值的算术平均值，平均速度为深度跨度与持续时长的比值；小计、合计中的速率均值和平均速度栏为对应曲线数值的算术平均值

Note: unless with special note, NVV is calculated based on the last IMF acquired from EMD decomposition curve of the original depth-time curve, and other statistical data comes from the original depth-time data; average NVV is the arithmetic mean of NVV, average speed is calculated by the depth span divided by the duration; average NVV and average speed in the subtotal and total is the arithmetic mean of relative list

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/147002136162006064>