



朱非清, 陈章, 武发思, 贺东鹏, 李隆, 陈海玲, 丁淑君, 汪万福. 敦煌莫高窟及周边环境拟步甲虫害调查研究 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (5): 1088 - 1096.

## 敦煌莫高窟及周边环境拟步甲虫害调查研究

朱非清<sup>1,2</sup>, 陈章<sup>1,2</sup>, 武发思<sup>1,2,3\*</sup>, 贺东鹏<sup>1,2</sup>, 李隆<sup>1,4</sup>,  
陈海玲<sup>1,2</sup>, 丁淑君<sup>1,2</sup>, 汪万福<sup>1,2,3</sup>

(1. 敦煌研究院国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心, 甘肃敦煌 736200; 2. 甘肃省敦煌文物保护研究中心, 甘肃敦煌 736200; 3. 兰州大学细胞活动与逆境适应教育部重点实验室, 兰州 730000; 4. 甘肃莫高窟文化遗产保护设计咨询有限公司, 甘肃敦煌 736200)

**摘要:** 自 2018 年以来, 每年春夏季在莫高窟窟区及周边荒漠都会出现大规模的拟步甲科昆虫活动, 对壁画保存和游客参观造成了影响。为明确拟步甲虫害情况, 采用样方法、陷阱法对该区域进行全面普查, 以明确拟步甲虫害类型、分布、暴发特点以及对文化遗产的危害。结果表明, 在莫高窟暴发的拟步甲科昆虫主要有 4 种: 洛氏脊漠甲 *Pterocoma loczyi*、克氏扁漠甲 *Sternotrigon kraatzi*、三沟胸鳖甲 *Colposcelis trisulcata* 和光滑胖漠甲 *Trigonoscelis sublaevigata*, 优势种为洛氏脊漠甲。莫高窟约 1/3 的调查洞窟内有拟步甲活动, 对起甲和酥碱壁画威胁较大; 其主要取食白刺 *Nitraria tangutorum*, 危害荒漠植被。虫害暴发与区域降雨量增加和植物食源丰富相关; 亟需采取有效防控措施, 以确保文物及其赋存环境安全。本研究为莫高窟虫害的监测防治和文物保护提供了科学依据。

**关键词:** 莫高窟; 昆虫危害; 保存环境; 监测防控; 文物保护

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 05-1088-09

## Study of darkling beetles damage in Dunhuang Mogao Grottoes and its surrounding areas

ZHU Fei-Qing<sup>1,2</sup>, CHEN Zhang<sup>1,2</sup>, WU Fa-Si<sup>1,2,3\*</sup>, HE Dong-Peng<sup>1,2</sup>, LI Long<sup>1,4</sup>, CHEN Hai-Ling<sup>1,2</sup>, DING Shu-Jun<sup>1,2</sup>, WANG Wan-Fu<sup>1,2,3</sup> (1. National Research Center for Conservation of Ancient Wall Paintings and Earthen Sites, Dunhuang 736200, Gansu Province, China; 2. Gansu Provincial Research Center for Conservation of Dunhuang Cultural Heritage, Dunhuang 736200, Gansu Province, China; 3. Lanzhou University, Key Laboratory of Cell Activity and Adaptation to Adversity, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China; 4. Gansu Mogao Grottoes Cultural Heritage Conservation Planning and Consulting Limited Liability Company, Dunhuang 736200, Gansu Province, China)

**Abstract:** Since 2018, there have been large-scale activities of darkling beetles in the Mogao Grottoes and the surrounding desert every spring and summer, which have some effects on the preservation of wall paintings and tourists' visiting. In order to clarify the situation of darkling beetles, the quadrat method and trap method were used to conduct a comprehensive survey in this area, so as to make clear the types, distribution, outbreak characteristics of darkling beetle and their hazards to the cultural heritage. The

基金项目: 国家自然科学基金 (32060258); 甘肃省科技计划项目 (20YF8WF016); 甘肃省文物保护科学和技术研究课题 (GWJ202010)

作者简介: 朱非清, 女, 1989 年生, 江苏无锡人, 硕士, 馆员, 研究方向为生物病害监测与文化遗产保护, E-mail: feiqing007@163.com

\* 通讯作者 Author for correspondence: 武发思, 博士, 研究馆员, 研究方向为文化遗产保护生物学, E-mail: wfs803@126.com

收稿日期 Received: 2021-07-13; 接受日期 Accepted: 2021-09-03

results showed that there were four species of darkling beetles in Mogao Grottoes, which were identified as *Pterocomma loczyi*, *Sternotricon kraatzi*, *Colposcelis trisulcata* and *Trigonoscelis sublaevigata*. The dominant species were *Pterocomma loczyi*. Approximately one-third of the caves had darkling beetles activity, which posed a greater threat to the wall paintings with flaking and salt efflorescence; it mainly fed on the *Nitraria tangutorum*, which harmed the desert vegetation. The pest outbreaks may associate with increased regional precipitation and abundant plant food sources; In order to protect the cultural heritage and its attached environment, some effective measures should be taken to prevent and control of darkling beetles. This study may provide a scientific basis for the monitoring and controlling of insect pests in Mogao Caves and the long-term protection of cultural heritage.

**Key words:** Mogao Grottoes; insect hazard; preservation environment; monitoring and control; cultural relics conservation

敦煌莫高窟是集壁画、彩塑于一体的佛教艺术宝库，1987 年列入世界文化遗产名录，具有重要的历史、艺术和科学价值。莫高窟地处荒漠生境，东接三危山，南有鸣沙山，西与库姆塔格沙漠相连，北为戈壁，周边沙生植物丰富，有梭梭 *Haloxyylon ammodendron*、白刺 *Nitraria tangutorum*、沙拐枣 *Calligonum mongolicum* 和盐生草 *Halogeton glomeratus* 等。独特的地理位置和生态环境，也为一些昆虫提供了理想的栖息和繁殖条件。对莫高窟昆虫危害已开展过相关调查，并对石窟优势害虫仿爱夜蛾 *Apopestes spectrum* 的行为特征及其对壁画的损害机理进行了研究（汪万福等，2005；2014）。

近年来，莫高窟及周边环境出现了新的虫害问题。较早记录，发现洞窟内有拟步甲昆虫零星活动是在 2014 年 10 月。自 2018 年春季以来，窟区及周边出现了大规模的拟步甲活动，至 2021 年拟步甲虫害问题仍然存在，对洞窟文物安全和游客参观造成了影响。有研究表明，拟步甲科昆虫常栖息在除水以外的陆地环境，分布从热带到亚热带和温带，从热沙漠至冷沙漠，但湿冷气候地区的种类较少。我国大陆拟步甲已知 570 余种，其半数以上的种类分布在西北荒漠、半荒漠地区（任国栋和于有志，1999）。拟步甲被称为沙漠的“典型宿主”，也是土壤沙化程度轻重的“指示虫类”（任国栋等，1993）。

为进一步排查虫害，明确昆虫种类、数量、分布及暴发成因，本课题组近年来先后开展了窟区环境和 300 余个洞窟的虫害调查分析，旨在为该处世界文化遗产地虫害的监测与防控提供科学依据。

## 1 材料与方法

本研究调查区域包括敦煌莫高窟窟区及周边窟顶戈壁、荒漠林带、后山戈壁植被、办公区周边植被带。从 2014 年 10 月至 2021 年 6 月开展了不间断的跟踪调查，本文主要分析数据来自 2018 年至 2020 年。在窟区对 300 余个洞窟按照由北到南的顺序进行了虫害情况系统普查。

昆虫调查采用样方法，在莫高窟周边选取 16 个 1 m<sup>2</sup> 的带有沙生植物的样方点（图 1），将样方点沙生植物上所有的拟步甲虫体收集并保存于密封袋中，用于种类鉴定和统计分析，确定优势种群。

采用陷阱法（李迎运和张大治，2016）对窟区拟步甲昆虫的优势种群及分布进行了验证，在莫高窟窟顶由南至北选取 10 个样方，样方周围有沙生植物分布，每个样方间隔距离 15 m，呈直线排列。利用不锈钢盆作为收集容器（口径 45 cm，深 20 cm）。在埋设收集容器时将容器边缘也埋入沙土中，便于昆虫落入。收集容器置于样点 3 d 后收取，获得的昆虫标本保存于密封袋和福尔马林中，带回实验室制成针插标本，进行种类鉴定、称重和统计分析等。

物种分类与鉴定主要依据《中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫》（任国栋和于有志，1999）；《中国土壤拟步甲志（第二卷鳖甲类）》（任国栋和巴义彬，2010）；《中国昆虫生态大图鉴》（张巍巍和李元胜，2011）。

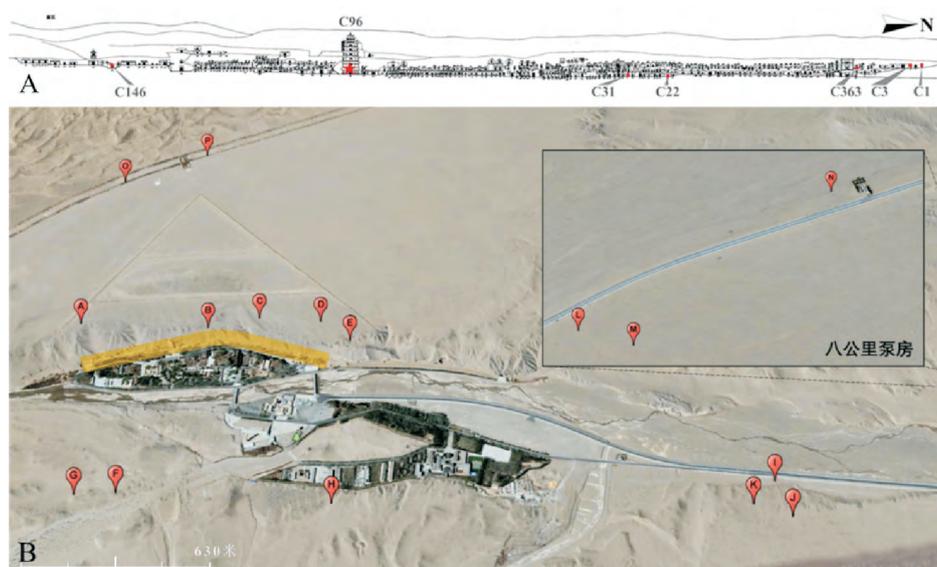


图1 样方法调查拟步甲科昆虫的位点

Fig. 1 Vegetation coverage of Mogao Grottoes and surrounding areas

注: A, 莫高窟立面图; B, 洞窟所在位置(黄色加亮)及调查位点; 字母 A-P 代表不同位点。Note: A, Elevation view of Mogao Grottoes; B, Location of caves (highlighted in yellow) and survey sites; Letters A-P represented different loci.

## 2 结果与分析

### 2.1 拟步甲形态学鉴定及优势种

经现场调查, 确定当前数量急剧增多的昆虫为鞘翅目 Coleoptera 拟步甲科 Tenebrionidae。经物种鉴定, 确定莫高窟暴发的拟步甲科昆虫主要有 4 种, 分别为洛氏脊漠甲 *Pterocoma loczyi*、克氏扁漠甲 *Sternotrigon kraatzi*、光滑胖漠甲 *Trigonoscelis sublaevigata* 以及三沟胸鳖甲 *Colposcelis trisulcata*, 分别隶属于漠甲族 Pimeliini 的脊漠甲属 *Pterocoma*、扁漠甲属 *Sternotrigon*、胖漠甲属 *Trigonoscelis* 以及鳖甲族 Tentyriini 胸鳖甲属 *Colposcelis*。结合现场实测数据和文献记录, 莫高窟的 4 种拟步甲的主要特征描述如下:

洛氏脊漠甲, 成虫体长  $12.65 \pm 2.85$  mm, 重  $0.21 \pm 0.06$  g, 黑色, 无光泽, 短卵圆形; 克氏脊漠甲, 成虫体长  $15.75 \pm 1.25$  mm, 重  $0.37 \pm 0.01$  g, 体宽卵形, 黑色, 稍光亮; 三沟胸鳖甲, 成虫体长  $12.5 \pm 1.5$  mm, 宽  $5.25 \pm 1.25$  mm, 重  $0.09 \pm 0.05$  g, 体细长, 黑色, 光亮(任国栋和巴义彬, 2010); 光滑胖漠甲, 成虫体长  $22.5 \pm 3.5$  mm, 重  $0.71 \pm 0.04$  g, 体黑色, 光亮和平滑(任国栋和于有志, 1999; 巴义彬, 2012)。

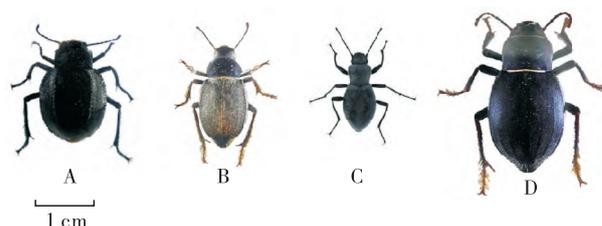


图2 莫高窟拟步甲科昆虫形态

Fig. 2 Morphological of darkling beetles in Mogao Grottoes  
注: A, 洛氏脊漠甲; B, 克氏扁漠甲; C, 三沟胸鳖甲; D, 光滑胖漠甲。Note: A, *Pterocoma loczyi*; B, *Sternotrigon kraatzi*; C, *Colposcelis trisulcata*; D, *Trigonoscelis sublaevigata*.

样方法调查结果显示, 洛氏脊漠甲个体数量最多、克氏扁漠甲和三沟胸鳖甲次之, 光滑胖漠甲最少, 分别占所捕获拟步甲科昆虫标本总数的 55.06% (196 头)、18.82% (67 头)、17.98% (64 头) 和 8.14% (29 头)。洛氏脊漠甲占有绝对优势, 其余 3 种为该区域范围内常见类群。有研究表明, 这些类群均为白天活动型类群(杨贵军等, 2016)。对典型植物上的拟步甲虫体进行统计(表 1)发现, 拟步甲植物选择偏好性顺序为白刺 > 梭梭 > 柠条 > 沙拐枣 > 红砂 > 麻黄 > 盐生草。白刺为拟步甲昆虫的主要偏好植物, 可能与以下

原因有关：调查时间处在白刺嫩芽萌发时期，白刺植株成为拟步甲容易聚集的觅食栖息场所；调查样方内的白刺较为茂盛，能产生更多的阴影并保存更多的水分 (Niu *et al.*, 2020)，为拟步甲科昆虫提供了更多的栖息点；白刺在区域沙生植物中属于优势种。样方点 I、L、N 与其他样方点相比所捕获的标本数量较少，根据先前研究表明，在荒漠生境中植物群落的多样性和植被密度对拟步甲个体数量有显著影响 (贺奇等, 2013)，从而推测越靠近窟区流沙人工封育生境和沙生植被生境，个体总数与物种数越多。窟区植被覆盖

度也较大，并可能造成了拟步甲科昆虫的聚集 (飯田仁等, 2019)。对窟区环境中采集到的 356 头拟步甲昆虫的个体数量  $I$  和物种数  $S$  进行相关性分析 (R 语言 basicTrendline 包)，分别采用线性函数 ( $I = a * S + b$ )、二次函数 ( $I = a * S^2 + b * x + c$ )、幂函数 ( $I = a * S^b + c$ )、指数函数 ( $I = a * \exp(b * S) + c$ ) 和对数函数 ( $I = a * \ln(S) + b$ ) 进行回归分析；结果显示指数函数的  $R^2$  值最大，为 0.9，拟合度最优，且  $a$ 、 $b$ 、 $c$  值分别为 4.8、-0.14 和 4，表明个体数量与物种数显著相关 (图 4)。

表 1 莫高窟窟区环境典型植物上拟步甲昆虫类群物种组成  
Table 1 Species list of darkling beetles in Mogao Grottoes

样方点 Quadrat point	植物 Plant	采集 标本 Specimen	优势种数量 Number of dominant species	洛氏脊漠甲 <i>Pterocoma loczyi</i>	克氏扁漠甲 <i>Sternotrigon kraatzi</i>	三沟胸螯甲 <i>Colposcelis trisulcata</i>	光滑胖漠甲 <i>Trigonoscelis sublaevigata</i>
A	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	20	4	12	5	2	1
B	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	15	3	8	4	3	0
C	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	35	4	22	3	7	3
D	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	101	4	54	12	20	15
E	梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	11	3	7	3	1	0
F	麻黄 <i>Ephedra sinica</i>	11	3	6	4	1	0
G	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	23	4	10	4	7	2
H	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	20	4	12	5	1	2
I	盐生草 <i>Halogeton glomeratus</i>	4	1	4	0	0	0
J	沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	21	3	13	3	5	0
K	红砂 <i>Reaumuria songarica</i>	13	3	8	4	1	0
L	沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	3	1	3	0	0	0
M	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	20	4	8	6	5	1
N	沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	8	3	3	1	4	0
O	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	21	4	14	4	2	1
P	梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	30	4	12	9	5	4
合计	Total quantity	356	4	196	67	64	29

## 2.2 分布特征

调查结果显示，拟步甲活动区域主要在洞窟外环境，因取食活动至窟顶边缘的大量成虫受大风等因素掉落至窟区地面。分布在九层楼周边洞窟，九层楼以南在第 146 窟周围较多，以北一直向下延伸，在藏经洞周围、洞窟第二层和三层的

栈道楼梯处、栈道边缘集中，在窟门角落、泥质墙体、木质窟门上都有其攀爬活动，这与拟步甲昆虫的生活节律基本一致，倾向于选择在热量和光照时间适中的、有阴影和有阳光的地方聚集 (杨贵军等, 2016)；洞窟地面也有少量拟步甲的活动。在莫高窟窟区发现有拟步甲科昆虫的洞窟

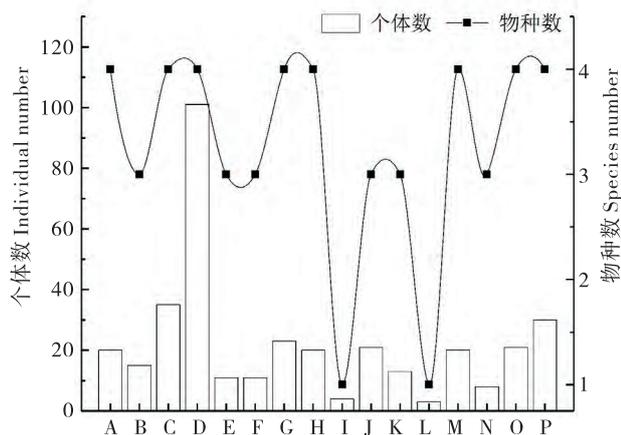


图3 不同调查样方拟步甲物种个体数曲线

Fig. 3 Curves of species and individuals of darkling beetles in different survey plots

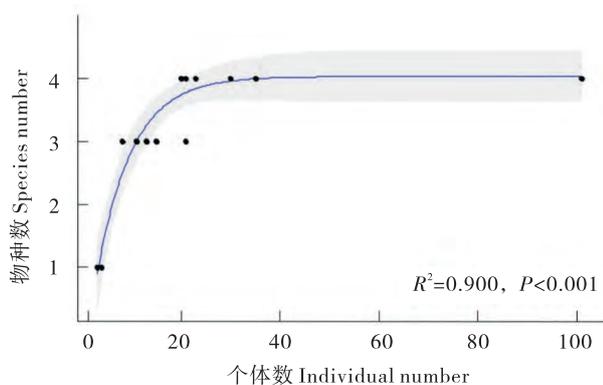


图4 不同调查样方拟步甲物种与个体数的关系

Fig. 4 Diagram of the relationship between the species and individuals of darkling beetles in different survey plots  
注: 阴影部分表示所属曲线的置信区间。Note: Shaded region represented the confidence interval of the curve to which it belongs.

共 108 个, 约占调查洞窟总数的 1/3, 其中九层楼以北区域洞窟有 79 个, 以南 29 个; 发现有拟步甲科昆虫 10 头以上的洞窟有 22 个, 其中九层楼以北区域的洞窟有 21 个, 以南仅 1 个; 拟步甲虫害比较严重的洞窟有 5 个, 分别是第 1 窟、第 3 窟、第 22 窟、第 31 窟和第 363 窟, 其中第 3 窟最为严重 (图 5), 有 50 多头拟步甲昆虫分布于洞窟门口、主室地面、甚至壁画上。调查发现, 以上洞窟的窟顶多为缓坡, 并且缓坡上白刺和沙生植物梭梭生长较多。

2020 年采用陷阱法调查了拟步甲在窟顶戈壁的分布, 统计后可知, 九层楼以南区域的拟步甲虫体数量 (212 头), 明显低于以北区域

(545 头), 其中洛氏脊漠甲数量最多, 为优势种群。

在莫高窟窟顶使用的陷阱法统计出的结果与窟区每日人为机械清扫收集到的拟步甲科昆虫数量的统计结果一致。植被密度可影响拟步甲昆虫群落的优势种和个体数量, 植被盖度和高度分别影响拟步甲群落的均匀度和丰富度 (杨贵军等, 2016; Cheli *et al.*, 2021), 纬度和海拔也在其物种丰富度方面发挥着重要作用 (Fattorini, 2020)。距莫高窟 8 km 处的戈壁, 由于植被覆盖相对较低, 其食源较少, 虫体密度亦较低。

### 2.3 虫害成因

拟步甲害虫主要来源于窟顶戈壁, 通常在每年 4 月至 5 月, 随着莫高窟天气转暖, 泡泡刺 *Nitraria sphaerocarpa* Maxim.、梭梭、沙拐枣等沙生植物嫩芽萌发, 成为拟步甲成体的主要食源; 此外 1 年生速生植物盐生草也是该虫的重要食源, 当沙生植物嫩芽被啃食干净后, 害虫会通过崖体和南北断崖迁徙至窟区, 在栈道和洞窟门口聚集。莫高窟北区害虫主要是从西边崖体处往河道方向爬行寻找新的食物源, 沿北区的路面及河道栏杆表面都有该虫攀爬的踪迹, 傍晚时河道栏杆下方可见大量害虫聚集。此次拟步甲虫害的发生可能与近年来敦煌地区降雨量增加、植被覆盖度升高密切相关 (图 5), 是局域生态环境改变诱发的级联效应之一。

### 2.4 危害特征

拟步甲科昆虫具有钻孔、打洞等行为特征, 对洞窟外围砂砾岩岩体底部造成了危害 (图 6-A), 昆虫零星爬入洞窟内活动, 一旦攀爬至壁画表面 (图 6-B, C), 其爪部对洞窟起甲和酥碱壁画可形成威胁, 导致脆弱的壁画颜料层脱落。春季沙生植物萌芽时啃食嫩芽、嫩叶和花 (图 6-D, F), 也会对周边覆盖植被和生态环境造成不利影响。

## 3 结论和讨论

在莫高窟窟区出现的 4 种拟步甲昆虫, 是西北地区戈壁、沙漠生境中常见种, 分别为洛氏脊漠甲、克氏扁漠甲、光滑胖漠甲和三沟胸鳖甲。其中洛氏脊漠甲为优势种, 克氏扁漠甲和三沟胸鳖甲次之, 光滑胖漠甲最少。脊漠甲属分布于我



图5 莫高窟窟区及周边区域植被

Fig. 5 Vegetation coverage of Mogao Grottoes and surrounding areas

注：A，突降雨后速生植被，摄于2016年9月21日；B，窟顶戈壁及鸣沙山植被，摄于2020年5月19日。  
 Note: A, Fast-growing vegetation after sudden rainfall, photo taken in Sept. 21, 2016; B, Vegetation of Gobi and Mingsha Mountain at the top of the cave, photo taken in May 19, 2020.

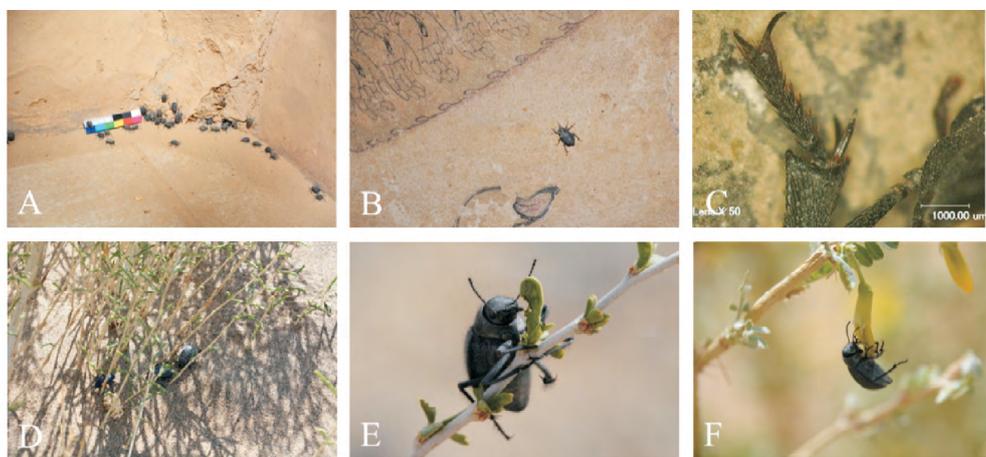


图6 拟步甲科昆虫的活动对莫高窟及周边生态的影响

Fig. 6 Effects of the activities of the darkling beetles to Mogao Caves and the surrounding ecology

注：A，在洞窟门口附近活动；B，在壁画上活动；C，拟步甲科昆虫爪部特征；D，在阴凉处休憩；E，啃食白刺嫩芽；F，啃食柠条花瓣。  
 Note: A, Move around the cave door; B, Move on the mural; C, Claw characteristics of the darkling beetles; D, Rest in the shade; E, Gnawing the buds of *Nitraria tangutorum* Bobr. ; F, Gnawing the petals of *Caragana microphylla*.

国昆仑山以北以及西北部以北地区，该属远距离主动扩散的能力较差，是典型的沙漠类群，其分布区主要是沙漠、沙地和戈壁地貌；扁漠甲属在我国已知8种，分布于新疆、甘肃、内蒙古等省区；胸鳖甲属主要分布于内陆荒漠地，分布范围为祁连山、贺兰山、毛乌素沙地等地区（巴义彬，2008）；胖漠甲属主要分布在我国的新疆和甘肃地区（巴义彬，2012）。研究指出，光滑胖漠甲的幼虫在白刺、骆驼蓬 *Peganum harmala* 等植物根缘沙内生活，活动能力强（于有志等，1995），成虫食嫩芽嫩叶，其大量出现可能会加速荒漠植被退化。拟步甲科昆虫在我国北方荒漠半荒漠生境

中被认为是植被退化的重要指示类群（李迎运和张大治，2016）；植被对沙漠动物是必不可少的，除了提供栖息场所和缓冲小气候外，还蕴藏着更多的水、土壤氧分和食物（Cheli *et al.*，2021）。因此亟需确立莫高窟及周边出现的4种拟步甲科昆虫与生境对应指示关系，这对于揭示荒漠景观格局与昆虫多样性变化之间的响应机制，以及对莫高窟赋存的荒漠生境监测和评估具有重要意义。

调查区域拟步甲科昆虫主要分布在窟顶九层楼以北区段。出现拟步甲的洞窟共计108个，虫体大多因爬行或大风吹落至窟区栈道。从气象资料分析可见，偏南风为莫高窟地方性风系，出现频

率高,但风力较弱(尤全刚等,2011)。南风多而弱是局地环流,具体规律性的季节变化和日变化,如该地区夜间多南风,冬季各月(10月至翌年2月)也几乎全是南风,风向相对稳定(汪万福,2018)。拟步甲科昆虫多出现于北段区域可能与出现频率较高的偏南风有关,加之北段区缓坡较多,拟步甲科昆虫更容易聚集。

拟步甲虫害近年在莫高窟及周边荒漠戈壁环境中全面暴发并非偶然,或与敦煌地区降雨量增加、生态环境改变及植物食源丰富相关。有报道称,西北地区近年来整体呈暖干化趋势,局部出现暖湿迹象,多种因素对局地生态环境改善有很大影响,如变暖引起的冰川和积雪消融增加,封山禁牧等生态环境保护措施,以及人工增雨的作用等,致使包括敦煌盆地在内的局地生态环境大大改善(张强等,2010)。1961年至2015年,甘肃省平均每10年升温 $0.29^{\circ}\text{C}$ ,降水东西有异,河西走廊每10年降水增加 $4\text{ mm}\sim 12\text{ mm}$ 。2018年甘肃省平均气温较常年偏高 $0.7^{\circ}\text{C}$ ,平均降水量较常年偏多 $27.7\%$ (张玉洁和王博,2019)。生态环境的变化引起拟步甲虫害在莫高窟及周边戈壁中的全面暴发,对荒漠植物造成了极大危害。在系统调查拟步甲虫害种类的同时,初步分析了拟步甲虫害的发生动态,为该区域拟步甲虫害的防控提供了科学依据。但本研究对虫害发生动态调查年限还较短,对其发生规律还有待进一步深入调查分析。

昆虫依靠脚爪和脚垫附着在墙壁或天花板上,在粗糙表面主要通过脚爪机械锁合方式附着,在光滑表面主要通过脚垫附着,脚垫分为光滑脚垫和刚毛脚垫,光滑脚垫基于毛细力吸附机制,而刚毛脚垫的附着基于 van der Waals 力机制(Ji, 2011)。昆虫在壁画表面运动与附着时,会对壁画表面产生损坏,其脚爪对壁画表面的机械力,会造成壁画表面的细微划痕甚至导致起甲病害壁画的脱落(吉爱红等,2015)。如果拟步甲昆虫6足都黏附在壁画表面,因每个点的受力面积非常小,壁画所承受的瞬间力就会非常集中,对存在起甲、酥碱粉化等病害壁画的损坏将不可避免。病害昆虫的活动和行为特征均可对脆弱壁画造成不利影响(汪万福等,2014)。调查发现,拟步甲一旦进入洞窟,会反复在垂直壁面上攀爬,其在壁画表

面活动时引起的损害不容忽视,相关危害机理当前尚不明确。

在掌握拟步甲生活史的同时,从生态学角度的阐释也至关重要,并据此提出相应的防治措施。采用农业领域和博物馆虫害综合管理的 IPM (Integrated Pest Management) 原则,以生态系统为管理单位,充分利用自然控制因素,强调防治措施间的相互协调,尽可能利用生物防治措施,并辅以化学防治或其它方法,以减少环境污染和维持生态平衡(陈杰林,1991;岡橋明子,2013)。根据成虫的生活史及习性,在莫高窟窟区及周边开展综合防治。如筛选针对拟步甲昆虫的环境友好型杀虫剂,并通过毒谷法即毒饵诱杀的方法降低虫口数量(钟启谦等,1957;赵世文等,2008);或使用生物防治手段,如引入害虫天敌和生物农药白僵菌(Wakil, 2021)等措施用于虫害防治及生态环境保护的评估。并加强洞窟的病害监测巡查,发现虫害迹象及时预警。因拟步甲科昆虫多为1~3年生,每年9月以后有越冬生活史,常将卵产于白刺、梭梭等沙生植物灌丛下方沙土深处,幼虫主要在沙生植物根部生活。筛选针对虫卵和幼虫的杀灭剂,对莫高窟窟顶治沙站林带植物根部及灌丛下方采用滴灌滴渗的形式施药,有助于减少成虫的暴发。采取措施如改善窟门的密封性、使用药棉堵塞洞窟上的孔洞等物理方法将拟步甲昆虫阻隔在窟外。同时进一步开展防治效果的跟踪评估和虫害的长期监测研究。

**致谢:**感谢河北大学博物馆巴义彬博士在拟步甲物种鉴定方面的大力帮助。感谢敦煌研究院保护研究所李洁在制图方面的帮助,感谢敦煌研究院文物保护技术服务中心徐瑞红馆员和敦煌石窟监测中心治沙站邱飞、詹鸿涛、李睿等在虫害调查过程中给予协助。

#### 参考文献 (References)

- Ba YB. Systematics of Pimeliinae and its Distribution in China (Coleoptera: Tenebrionidae) [D]. Baoding: Hebei University, 2012. [巴义彬. 中国漠甲亚科分类与地理分布(鞘翅目:拟步甲科)[D]. 保定:河北大学,2012]
- Ba YB, Ren GD, et al. Funnal composeiyion and analysis of the Tribe Tentyriini beetles from China (Coleoptera, Tenebrionidae) [J]. *Journal of Hebei University (Nature Science Edtion)* 2008, 28 (4): 407-413. [巴义彬,任国栋. 中国鳖甲族昆虫的区系组成与分析(鞘翅目:拟步甲科)[J]. 河北大学学报(自

- 然科学版), 2008, 28 (4): 407-413]
- Cheli GH, Carrara R, Bandieri L, *et al.* Distribution and environmental determinants of darkling beetles assemblages (Coleoptera; Tenebrionidae) in Península Valdés (Argentinean Patagonia) [J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 2021, 93 (3): e20201282.
- Chen JL. Integrated Pest Management [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1991. [陈杰林. 害虫综合防治 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1991]
- Fattorini S. Conservation biogeography of Tenebrionid beetles: Insights from Italian reserves [J]. *Diversity*, 2020, 12 (9): 348.
- Hitoshi I, Miyu I, Tomoyuki Y, *et al.* Annual change of abundance and wood preference of two stag beetles in Ibaraki prefecture [J]. *Sayabane N. S.*, 2019, 9 (35): 21-27. [飯田仁, 飯田実優, 横井智之, 等. 茨城县の里山に生息するクワガタムシ2種における個体数の年次変化および樹種選好性 [J]. *Sayabane N. S.*, 2019, 9 (35): 21-27]
- He Q, Yi YB, Zeng L, *et al.* Diversity of darkling beetles in desert steppe in Yanchi of Ningxia China [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2013, 35 (6): 713-719. [贺奇, 殷延勃, 曾乐, 等. 盐池四墩子荒漠草原拟步甲昆虫群落多样性研究 [J]. 环境昆虫学报, 2013, 35 (6): 713-719]
- Ji A, Han L, Dai Z. Adhesive contact in animal: Morphology, mechanism and bio-inspired application [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2011, 8 (4): 345-356.
- Ji AH, Wang WF, Yan JF, *et al.* Adhesive force of *Apopestes spectrum* (Esper) on a simulated mural in Dunhuang Mogao Grottoes [J]. *Dunhuang research*, 2015, 1: 111-115. [吉爱红, 汪万福, 闫俊峰, 等. 仿爱夜蛾在敦煌莫高窟模拟壁画表面的附着力研究 [J]. 敦煌研究, 2015, 1: 111-115]
- Li YY, Zhang DZ. Preliminary screening for darkling beetles as bioindicators in desert habitat [J]. *Ecological Science*, 2016, 35 (1): 67-74. [李迎运, 张大治. 荒漠生境拟步甲科指示性昆虫的初步筛选 [J]. 生态科学, 2016, 35 (1): 67-74]
- Niu YP, Ren GD, Lin G, *et al.* Fine-scale vegetation characteristics drive insect ensemble structures in a desert ecosystem: The Tenebrionid beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) inhabiting the Ulan Buh Desert (Inner Mongolia, China) [J]. *Insects*, 2020, 11 (7): 410. <https://doi.org/10.3390/insects11070410>.
- Okabashi A. Protecting files from mould, insect and human: IPM (Integrated Pest Management) for libraries [J]. *The Library Journal*, 2013, 107 (10): 627-627. [岡橋明子. "カビ・ムシ・ヒト" から資料を守る: IPM (総合的有害生物管理) を図書館に [J]. 図書館雑誌, 2013, 107 (10): 627-627]
- Ren GD, Ba YB. Fauna of Soil Darkling Beetles in China Vol.2 Tentyriforms (Coleoptera: Tenebrionidae) [M]. Beijing: Science Press, 2010. [任国栋, 巴义彬. 中国土壤拟步甲志: 第二卷蜚甲类 [M]. 北京: 科学出版社, 2010]
- Ren GD, Yu YZ. The Darkling Beetles from Deserts and Semideserts of China (Coleoptera: Tenebrionidae) [M]. Baoding: Hebei University Publishing House, 1999. [任国栋, 于有志. 中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫 [M]. 保定: 河北大学出版社, 1999]
- Ren GD, Yu YZ, Ma F. Desert environment and adaptation of darkling beetles [J]. *Journal of Ningxia University (Agriculture Science Edition)*, 1993, S1: 85-92. [任国栋, 于有志, 马峰. 荒漠环境与拟步甲适应 [J]. 宁夏大学学报 (农业科学版), 1993, S1: 85-92]
- Wang WF, Ji AH, Wu FS, *et al.* Locomotive behavior and damaging mechanism of adult *Apopestes spectrum* (Lepidoptera: Noctuidae) on mural surface in a simulated cave of Mogao Grottoes Dunhuang [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57 (6): 703-709. [汪万福, 吉爱红, 武发思, 等. 仿爱夜蛾成虫在莫高窟模拟壁画表面的运动行为及其损害机理 [J]. 昆虫学报, 2014, 57 (6): 703-709]
- Wang WF, Lin CY, Wang T, *et al.* Damages by excretion of *Apopestes spectrum* (Esper) imagoes on the Dunhuang murals and their control [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2005, 48 (1): 74-81. [汪万福, 蔺创业, 王涛, 等. 仿爱夜蛾成虫排泄物对敦煌石窟壁画的损害及其治理 [J]. 昆虫学报, 2005, 48 (1): 74-81]
- Wang WF. Prevention and Control of Sand Dunes Hazard in Dunhuang Mogao Grottoes [M]. Beijing: Science Press, 2018. [汪万福. 敦煌莫高窟风沙危害及防治 [M]. 北京: 科学出版社, 2018]
- Wakil W, Schmitt T, Kavallieratos NG. Persistence and efficacy of enhanced diatomaceous earth, imidacloprid, and *Beauveria bassiana* against three coleopteran and one psocid stored-grain insects [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 23459-23472.
- Yang GJ, Jia L, Zhang JY, *et al.* Distribution of darkling beetles and its relationships with topography in Helan Mountain Ningxia [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2016, 38 (1): 77-86. [杨贵军, 贾龙, 张建英, 等. 宁夏贺兰山拟步甲科昆虫分布与地形的关系 [J]. 环境昆虫学报, 2016, 38 (1): 77-86]
- Yang GJ, Wang XP, Jia YX, *et al.* Diversity of darkling beetle community in the artificial cultivation *Caragana intermedia* shrub-desert grassland ecotone in Yanchi County Ningxia China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (3): 608-619. [杨贵军, 王新谱, 贾彦霞, 等. 人工柠条-荒漠草地交错带拟步甲昆虫群落多样性 [J]. 生态学报, 2016, 36 (3): 608-619]
- Yu YZ, Ren GD, Ma F. On eight species of larvae of the subfamily Pimeliinae (Coleoptera: Tenebrionidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 1995, 38 (3): 347-354. [于有志, 任国栋, 马峰. 漠甲亚科八种幼虫记述 [J]. 昆虫学报, 1995, 38 (3): 347-354]
- You QG, Xue X, Wang T, *et al.* Preliminary study on blown sand disaster along the Gobi highway [J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 1: 9-15. [尤全刚, 薛娴, 王涛, 等. 戈壁地区风沙活动对公路影响的初步研究 [J]. 中国沙漠, 2011, 1: 9-15]
- Zhang WW, Li YS. Chinese Insect Illustrate [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2011 [张巍巍, 李元胜. 中国昆虫

- 生态大图鉴 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2011].
- Zhang Q, Zhang CJ, Bai HZ, *et al.* New development of climate change in northwest China and its impact on arid environment [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2010, 28 (1): 1-7. [张强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响——总体暖干化, 局部出现暖湿迹象 [J]. 干旱气象, 2010, 28 (1): 1-7]
- Zhang YJ, Wang B. Drunk and beautiful Northwest Green Gleason | expert: Northwest is warming: Xinhua Net [EB/OL]. (2019-09-11) [2021-8-15]. [http://m.xinhuanet.com/gs/2019-09/10/c\\_1124982344.htm](http://m.xinhuanet.com/gs/2019-09/10/c_1124982344.htm). [张玉洁, 王博. 醉美西北绿 | 专家: 西北正出现变暖: 新华社新媒体 [EB/OL]. (2019-09-11) [2021-8-15]. [http://m.xinhuanet.com/gs/2019-09/10/c\\_1124982344.htm](http://m.xinhuanet.com/gs/2019-09/10/c_1124982344.htm)]
- Zhao SW, Dong XG, Li XS, *et al.* Study on trapping and killing effects of several bait on *Calosoma maximoviczi* Morawitz [J]. *Liaoning Tussah Silk*, 2008, 2: 18-20. [赵世文, 董绪国, 李喜升, 等. 几种饵料对黑广肩步甲诱杀效果研究 [J]. 辽宁丝绸, 2008, 2: 18-20]
- Zhong QQ, Wei HJ, Qi RL. The control of soil insects with "BHC POISON GRAIN" [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 1957, 1: 53-65. [钟启谦, 魏鸿钧, 齐瑞霖. 地下害虫防治研究 II. 666 毒谷兼治地下害虫的研究 [J]. 昆虫学报, 1957, 1: 53-65]