

蜣螂与壁虎刚毛的比较及改形对其功能的影响*

孙久荣^{1**} 郭策² 程红¹ 王卫英² 于敏² 曾学思³ 吉爱红²

戴振东²

1. 北京大学生命科学学院, 北京 100871

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016

3. 中国医学科学院, 中国协和医科大学皮肤病研究所, 南京 210042

Comparison of the setae between the dung beetle *Copris ochus* and the gecko *Gekko gekko* and the effects of deformation on their functions*

SUN Jiu-Rong^{1**}, GUO Ce², CHENG Hong¹, WANG Wei-Ying², YU Ming², CENG Xue-Si³,
JI Ai-Hong², DAI Zhen-Dong²

1. College of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. Depart. of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

3. Institute of Dermatology, Chinese Academy of Medical Science, Peking Union Medical College, Nanjing 210042, China

Abstract Scanning electron microscopy (SEM) and histological techniques were used to observe and study the structure of setae on the integument surface of the dung beetle *Copris ochus* Motschulsky and on the foot pad of the gecko *Gekko gekko* and their relationship to anti-adherent and adherent functions respectively. There are very distinctive comparison between the structures and the constructs of the setae on the dung beetle and the gecko: the setae of the dung beetle are ramification of the integument, mainly distributing on the body abdomen surface and the lateral side of the legs, loosely arranging, having different length with many buds and sticks along the whole seta body but without side branches, uprightly directing to the contacting dung face. The setae of the gecko are protuberances from the skin, arranging in order and densely, regularly directing, branching in twice with curved top. The histological observation found that dung beetle's setae are empty inside with lots micro-foramens communicating to the inner side on the base of the buds and sticks on the seta and also connecting with the oil glands below the integument, but without the erect muscle. Gecko setae are surrounded by fat cells and muscles. Results from functional experiments suggest that deformation of the setae of the dung beetle integument could reduce the anti-adherent function and also the same kind of change could reduce the adherent function of the gecko setae on the leg bottom. These results offer important information for preparation of the soil machine and components imitating dung beetle setae flexible non-adherence and for designing artificial setae imitating the gecko's adherent setae [Acta Zoologica Sinica 51 (4): 761–767, 2005].

Key words Dung beetle, *Copris ochus*, Gecko, *Gekko gekko*, Setae, Adhesion, Anti-adhesion, Bionics

关键词 蜣螂 壁虎 刚毛 粘附 脱附 仿生学

脱附与粘附是工程作业的两个相互矛盾的难题, 土壤和物料的粘附严重降低了机械的作业效率和质量, 没有粘附又使某些机械无法工作或运行。目前世界流行的脱附技术, 包括向界面注入空气的充气法、向界面注入溶液的充液法、利用机械或超声波的振动法、施加电场的电渗法、施加磁场的磁

化法和在触土部件表面上涂料的涂层法等, 但这些方法或技术都有不尽人意之处 (Vincent and Mann, 2002; Ren et al., 2001a, b)。与脱附要求相反, 能够在各种表面上运动的特种机器人 (一般称为爬壁机器人) 则要求其脚掌和接触表面间产生足够的粘附力, 以保证其在墙壁或者天花板上的工

2004-12-24 收稿, 2005-04-26 接受

* 国家科技部项目 (No.2002CCA01200) 和国家自然科学基金项目 (No.30470230, No.30400086) [This research was funded by the grants from China National Key Grant of Basic Scientific Project (No.2002CCA01200) and the National Natural Science Foundation of China (No.30470230 and 30400086)]

** 通讯作者 (Corresponding author). E-mail: sjr@pku.edu.cn

© 2005 动物学报 Acta Zoologica Sinica

作。同时该粘附还需方便地脱附,以满足机器人快速移动地需要。目前国内外多采用真空吸附(如英国研制的机械人 Robug II)或者磁吸附(如法国研制的机械人 RM3)的方法为这类机器人提供粘附力(李鲁虹, 1992)。但这些技术在应用中都受到一定的限制。

蜚螂生存在粘湿土壤环境中,其体表具有优良的抗粘附功能。这是土壤动物经过长期进化对土壤环境的适应(忻介六, 1986)。在我们前期有关蜚螂脱附理论和仿生学应用的研究中,根据蜚螂背部体表非光滑结构提出脱附的“非光滑表面”假说。这个假说得到国内外同行们的赞同和引用(Ren et al., 2001a; 程红等, 2002; 孙久荣等, 2001)。之后,我们又发现了蜚螂腹部体刚毛的柔性脱附作用(Sun et al., 2004)。

对粘附作用的仿生学观测当首推对壁虎脚底刚毛的研究。壁虎高超的攀爬能力一直是科研人员重点研究的对象。实验中,壁虎能以 1 m/s 的速度在垂直的抛光玻璃表面上攀爬,且只靠一个脚趾就能够把整个身体稳当地悬挂在墙上。这一绝技是其它动物望尘莫及的(Zaaf et al., 2001; Antumn et al., 2000)。

本工作将蜚螂(*Copris ochus*)体表刚毛与大壁虎(*Gekko gekko*)脚底的刚毛做比较性研究,从另一角度分析蜚螂刚毛的脱附和壁虎刚毛的粘附作用与形态的关系,进一步揭示脱附和粘附的机制,为解决机械工程脱附和粘附的设计提供新的信息。

1 材料与方法

1.1 扫描电镜观察

8 只成体臭蜚螂和 4 只成体大壁虎用于扫描电镜观察。8 只蜚螂中雄性 4 只,体长 21–23 mm; 雌性 4 只,体长 22–26 mm。4 只大壁虎中雌、雄各半,体长 27–29 mm。用 10% 甲醛固定后,分别取蜚螂的头、前胸、中后胸、腹部和鞘翅部及壁虎的趾部。参考程红等(2002)的方法,用酒精(70%、80%、90%、95%、100%)逐步脱水,每一个步骤所用时间约为 24 h。临界点干燥(CPDO30 Critical Point Dryer)持续 3 h 后,用离子溅射仪(SCD005 Sputter Coater)喷金,最后用 FEI QUANTA 200(日本光电)扫描电子显微镜观测。

1.2 细胞组织学观测

参考程红等(2003)的方法,将蜚螂体表和肢

体及壁虎的脚趾分别进行固定、中和、水洗、脱水、包埋、固定切片(厚 10 μm)和染色,最后通过 Motic B 系列生物显微镜(麦克奥迪公司)进行观测和照相。

1.3 蜚螂刚毛的改形和脱附能力的检测

1.3.1 蜚螂刚毛的改形方法 将蜚螂腹侧朝上,用橡皮泥固定躯体,用小橡皮夹固定各个脚的足节。在实体显微镜下,用自制的微型电烙铁(15 w、烙铁头长 5 cm、尖端直径 1 mm)烘烤蜚螂腿的两侧、胸–腹部接缝、腹部表面和上层基腹面及其外沿的刚毛。控制烘烤时间 10–15 s,距离 3–4 mm。在扫描电镜下观测和控制烤制的效果,只需将上述部位的刚毛烤弯,使之交织紊乱即可。

1.3.2 观测改形刚毛的脱附能力 参照 Sun et al. (2004)的方法,实验前将 40 只蜚螂分为正常组和改形组,每组 20 只,雌、雄各半。分别测量正常组和改形组在牛粪上自由活动前后的总体重。结果的差异性用 Student *t* 检验。

1.4 壁虎刚毛的改形和粘附能力检测

1.4.1 壁虎刚毛的改形方法 在实体显微镜下,用自制的微型电烙铁(同上)烘烤离体壁虎脚趾底部的刚毛。控制烘烤时间约 2–6 s,距离约 5 mm,制备不同程度改形刚毛的脚趾。在扫描电镜下观测烤制的结果。

1.4.2 检测改形前后刚毛表面化学元素构成的变化 在扫描电镜观测脚底刚毛形态变化的同时,通过 JSM-5600 LV(日本光电)测量改形前后刚毛表面主要元素的变化。测量条件为:工作电压 20.0 KV、电子束强度 150.0 picoAmps、工作距离 20.0 mm、倾斜角度 0.0 度、发射角度 27.8 度。结果的差异性用 Student *t* 检验。

1.4.3 观测改形刚毛的粘附能力 通过压力换能器(JZJ01 型)和生物信息采集分析系统(RM6240-BD、成都仪器厂)分别测量活体脚趾、离体脚趾和不同改形刚毛的粘附力。结果的差异性用 Student *t* 检验。

2 结果

2.1 蜚螂与壁虎刚毛的形态和构筑有明显的差异

扫描电镜结果显示,蜚螂的刚毛主要分布在体表的腹面和腿的两侧。腹面的刚毛长 800–900 μm ,毛尖斜向外侧。腿侧面的刚毛分布因节而异:其中基节的刚毛集中在节的基部,呈丛状;腿节和胫节的刚毛较长(约 1–1.2 mm)、沿腿的两侧整

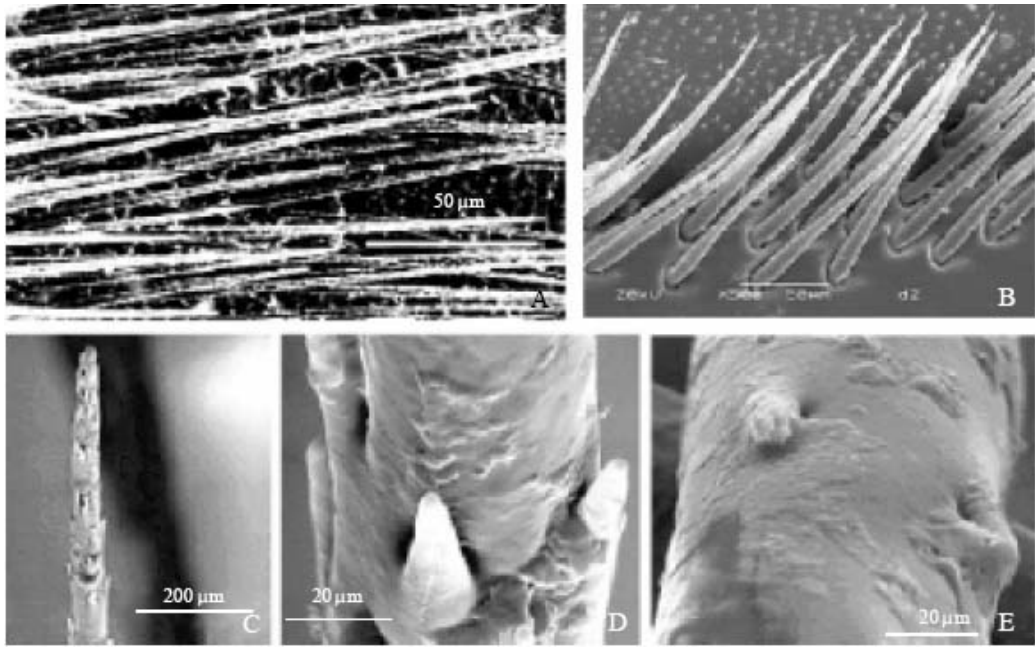


图 1 蜣螂腹部的刚毛

A. 外腹部的刚毛。B. 鞘翅边缘的刚毛。C. 直立的刚毛周身生有芽刺。D. 芽刺内侧有微孔。E. 刚毛横置示微孔。

Fig.1 Setae on the ventral side of the dung beetle

A. Setae on the outside of the abdomen, Bar=50 μm. B. Setae on the edge of the elytra, Bar=50 μm. C. The buds and sticks along the erecting setae, Bar=200 μm. D. Micro-foramens on the inner side of the base of the buds, Bar=20 μm. E: Horizontal setae showing the micro-foramens, Bar=20 μm.

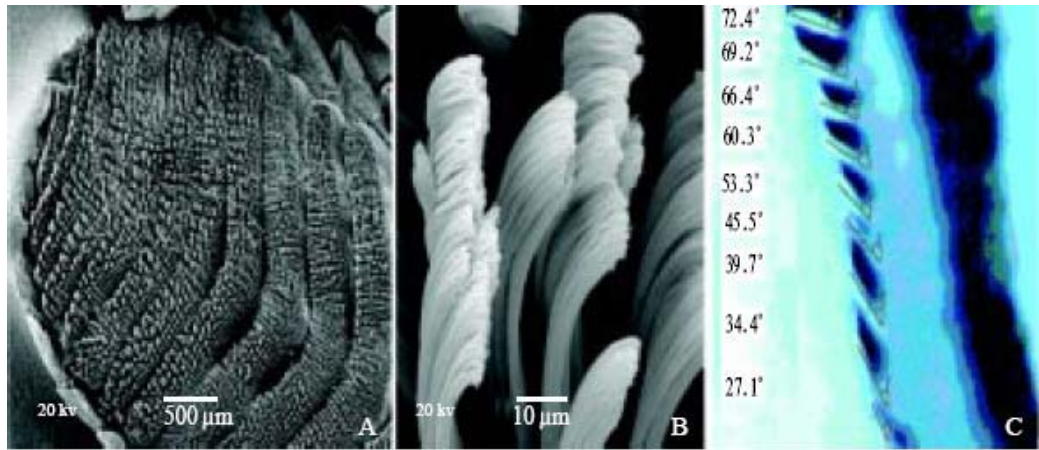


图 2 壁虎脚上的刚毛

A. 第 3 脚趾底面的皮瓣和刚毛。B. 示刚毛尖端弯曲和分支。C. 脚趾侧面观，示皮瓣与趾间夹角。

Fig.2 Setae on the gecko toes

A. Setae on the dermal valvulae of the bottom of the third toe, Bar=500 μm. B. Magnifying the branching with curved top of the setae above left. C. Lateral view of the toe showing the angles between the dermal valvulae and digital bones.

齐排列、分布均匀（毛根间距约 100 μm）、方向与接触土壤的表面呈垂直角度；跗节的刚毛集中在各小节端成束状；足尖端的刚毛数量少而粗大，毛根直径约 20 μm，与粗大的距共同构成趾端。电镜发现，刚毛的周身多生有刺芽，刺芽的内侧有微孔（图 1）。

壁虎每只脚趾底形成膨大的趾垫，垫的表面有

15-21 排横行排列的皮瓣，又称趾下瓣（图 2：A）。瓣上密集生长着刚毛。从脚上的皮瓣数、皮瓣的面积、每个扫描电镜画面所显示的面积和大约的刚毛数来估算，每只脚趾生有数百万根刚毛。扫描电镜结果显示，这些刚毛长约 100 μm，直径约 2 μm。刚毛上端有分支。刚毛下段约垂直于皮瓣，上部的尖端多弯向趾心（图 2：B）。通过 Motic B

系列生物显微镜（麦克奥迪公司）发现，皮瓣与趾骨间的夹角从趾端到脚心次第变小，如图 2：C 所示：第一排皮瓣与趾骨的夹角为 72.4 度，而后次第为 69.2、66.4、60.3、53.3、45.5、39.7、34.4，到第 9 排夹角为 27.1 度。

2.2 蜥螂与壁虎刚毛的内部结构不同

细胞组织学切片显示，蜥螂的皮肤表面有两种突出的衍生物：密集的、在光镜下呈透明的小刺突和长而大的刚毛。在刚毛的基部有小孔，孔径为 5–7 μm ，与体内的油脂腺相通。刚毛的基部和周围没有肌肉组织与之相连。刚毛的横断切面显示，刚毛内部中空，是一管状结构。

观测了壁虎脚趾刚毛从顶部到底部连续的水平切片。在高位切片中大量的是刚毛顶部弯曲部的断面，少量的是顶部的横断面（图 3：A）；中位切片中刚毛中部的横断面呈簇状，每一簇内约有 4 根刚毛

毛，刚毛的内容物丰满（图 3：B）；低位切片中显示了位于刚毛基部的上皮细胞、脂肪细胞、色素细胞和肌肉组织（图 3：D）。

2.3 蜥螂刚毛的形态与脱附功能相关

在实体显微镜下，控制烤制时间和距离，将蜥螂腹部和腿侧的刚毛改形，使之排列紊乱。

仿照 Sun et al. (2004) 的方法，实验前分别称量正常组和改形组蜥螂（各 20 只）的总体重（3 次），然后在硬纸板（1 m × 1 m）上将 1 h 前排泄的牛粪铺成约 2 cm 厚。分别将正常组和改形组的蜥螂置于牛粪上自由活动，10 min 后取回称总体重。称重后用细毛刷小心除去蜥螂身上粘附的粪渣。30 min 后再进行第 2 次实验。如此实验 5 次，取均值。由于蜥螂身上的粪渣不易收集，结果只用体重的变化表示（表 1）。

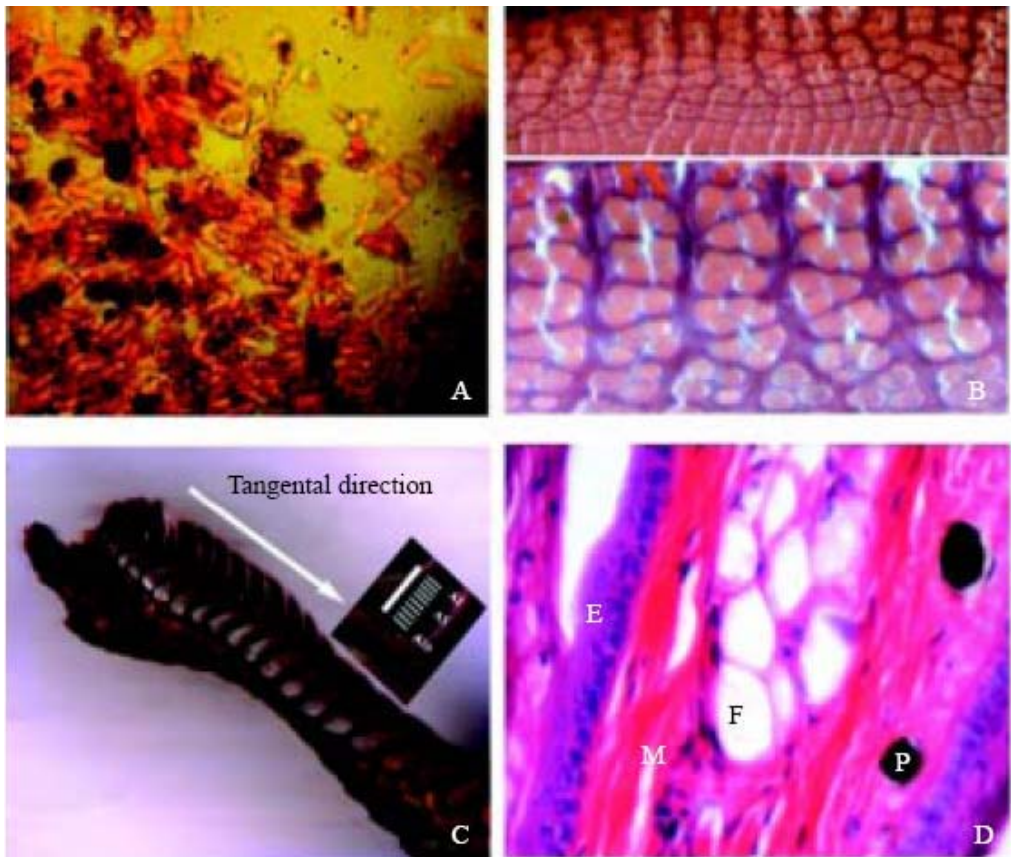


图 3 壁虎脚趾刚毛的横断面切片

A. 刚毛顶部的横断面切片（1 000 \times ）。B. 刚毛中间部的横断面切片（上图 400 \times ，下图 1 000 \times ）。C. 组织学切片的方向。D. 刚毛底部的横断面切片（400 \times ）。E: 上皮细胞。F: 脂肪细胞。M: 肌肉组织。P: 色素细胞。

Fig.3 Transverse sections of the setae on the gecko's toe

A. Transverse section through the top of the setae, 1 000 \times . B. Transverse section through the middle parts, 1 000 \times . C. Showing the cutting direction of the sections. D. Transverse section through the bottom of the setae, 1 000 \times . E: Epithelia. F: Fat cell. M: Muscle tissue. P: Pigmental cells.

表 1 蜥螂刚毛脱附作用的观测

Table 1 Observing the setae's non-adherence of the dung beetle

	实验前体重 Weight before test (g) (20 individuals)	实验后体重 Weight after test (g) (20 individuals)
Normal	62.5±2.4	73.0±11.8
Setae changed	66.8±2.9	103.4±14.4

实验前正常组与改形组间总体重的差异不显著 ($n=5$, $t=1.98$, $P>0.10$); 正常组实验前、后总体重变化不显著 ($n=5$, $t=1.08$, $P>0.20$); 实验后正常组与改形组间总体重变化的差异明显 ($n=5$, $t=2.83$, $P<0.05$)。改形组实验前、后总体重变化的差异显著 ($n=5$, $t=4.29$, $P<0.02$)。

We checked the results by Students't test and found that the difference between their sum weights of the normal group and the changed group before the test is not distinctive ($n=5$, $t=1.98$, $P>0.10$); the difference of the sum weights of the normal group between before and after the tests is not distinctive ($n=5$, $t=1.08$, $P>0.20$); the difference between their sum weights of the normal group and the changed group after the test is obvious ($n=5$, $t=2.83$, $P<0.05$); the difference between their sum weights of the changed group before and after the tests is distinctive ($n=5$, $t=4.29$, $P<0.02$).

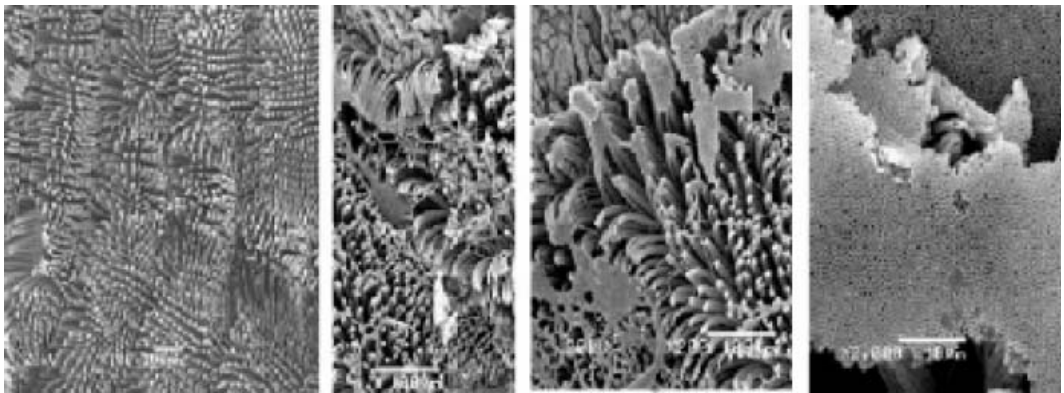


图 4 壁虎脚底刚毛改形前、后形态的比较

A. 正常组。B. 低变组。C. 中变组。D. 高变组。

Fig.4 The morphological comparison of the gecko's setae before and after changed

A. Normal group, Bar=100 μm . B. Group changed in lower degree, Bar=100 μm . C. Group changed in middle degree, Bar=100 μm . D. Group changed in high degree, Bar=100 μm .

表 2 改形前后壁虎刚毛的主要元素组分

Table 2 The main chemical elements components on the gecko's surface of the setae before and after deformation

	C	O	P	Si	S	Cl	K	Ca
改形前 Before deformation (atomic%)	85.86	5.09	2.12	0.18	6.08	0.07	0.35	0.25
改形后 After deformation (atomic%)	86.56	4.78	1.99	0.15	5.86	0.07	0.37	0.22

2.4.2 改形的刚毛丧失粘附能力 分别测量刚毛改形前、后脚趾的粘附力。测试中模拟壁虎脚趾爬行的模式，牵拉脚趾时，使脚底与换能器 (JZJ01 型) 受力面的夹角约为 5 度。测试时均匀、恒速向后 (脚心) 牵拉脚趾。其粘附力变化如图 5 所示，

2.4 壁虎刚毛的结构与粘附功能相关

在实体显微镜监测下，控制烘烤距离 (约 5 mm)，烘烤时间分别约 2-6 s，制备不同程度改形的刚毛。依刚毛的改形程度，将离体的脚趾分三组 (每组 $n=5$)，扫描电镜显示：低变组 (图 4: B) 中仅少量刚毛变形和出现横向交织；中变组 (图 4: C) 中大量刚毛尖端变形，大部分刚毛“胶”连在一起；高变组 (图 4: D) 中所有的刚毛被烤“焦”，丧失刚毛构筑的形态；没有烘烤的为正常组 (图 4: A)。

2.4.1 改形并不影响刚毛的表明化学构成 在扫描电镜观测脚底刚毛形态的同时，测量了刚毛改形前、后刚毛表面主要元素的变化。结果表明，被检测的每种元素占总监测元素的相对含量在改形过程中没有明显改变 (表 2)。

结果见表 3。

3 讨论

刚毛的功能可以粘附，也可以脱附，关键在于刚毛的形态。蜥螂和壁虎的刚毛结构和功能形成鲜

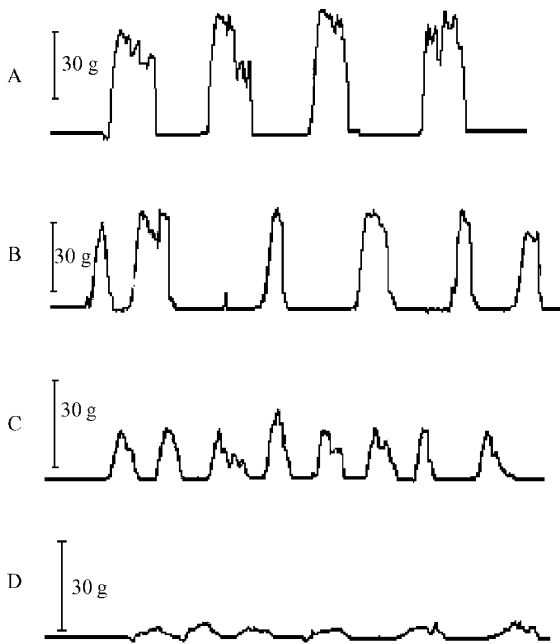


图5 壁虎脚底刚毛改形前后粘附力的变化

A. 正常组。B. 低变组。C. 中变组。D. 高变组。

Fig.5 Changes of the adherent force between the gecko's setae before and after deformation

A. Normal group. B. Group changed in lower degree's. C. Group changed in middle degree's. D. Group changed in high degree's.

表3 壁虎脚底刚毛离体前后和改形前后粘附力比较

Table 3 A Comparison of the adherent force curve between the setae before and after deformation

组次 Group	正常组 Normal group	低变组 Changed in lower degree	中变组 Changed in middle degree	高变组 Changed in high degree
$\bar{x} \pm s$ (g)	41.5 ± 4.3	32.5 ± 3.7	17.0 ± 8.6	4.2 ± 3.2

壁虎脚底改形后绒毛的粘附力明显降低。降低程度与改形程度密切相关，各组织间差异显著 (Student *t* 检验, $n=8$, t 分别为 2.79, 2.86, 2.48; $P<0.05$)。

Adherent ability of form-changed setae of the gecko's toe bottom reduces significantly. The reducing degree was related closely to the changed degree of the form. The difference between the different histological structures were significant, Students' *t* test, $n=8$, $t=2.79, 2.86, 2.48$; $P<0.05$.

明的对照。蜥脚刚毛在正常形态有脱附功能，破坏刚毛正常形态使其脱附功能显著降低。我们观测过，人为破坏活壁虎所有的脚底毛后基本不再具有黏附功能。因为没有办法保证对所有脚底毛的人为破坏程度一致，也不能同时定量观测所有脚底毛的功能，于是采取离体的办法。Antumn et al. (2000) 测量刚毛的粘附力也是采取离体的办法。

改形的实验结果证实，壁虎脚趾粘附的能力决定于脚趾的大小和形状，而不是表面的化学构成。

蜥脚刚毛的构筑形态是有利于脱附的。蜥脚的刚毛排列疏散、长度不一、直立而多刺、尖端没有分叉、方向与接触土壤的表面呈垂直角度，构成具有脱附功效的柔性界面。在动物体表与土壤界面的相对运动过程中，土壤对体表的摩擦阻力 F 可用库仑方程： $F = CA + P \times \text{tg}\Phi$ 表示，其中 C 为土壤粘附力， A 为接触面积， P 为垂直界面正压力， Φ 为土壤对动物体表的外摩擦角。对于一定的土壤条件，粘附程度主要取决于接触面积 A ，所以，减少接触面积是抗粘附的关键。刚毛构成的柔性表面无疑使体表与土壤界面间存在一些间隙，有效地减少接触面积。这个间隙内可形成一个有气、无土和无水区，即使对于含水量较多的粘性土，也会使水膜不易连续。此外，弹性的刚毛产生与前进方向垂直的抖动，使土壤界面不断受到与界面垂直的正、反两方面力的反复作用。这样，一方面缓解土壤对动物表面的压力，另一方面由于抖动产生的速度和方向的变化使土壤中水分和空气易于逸出，从而增加润滑和脱附作用。Neinhuis and Barthlott (1997) 研究了荷叶不粘油污的性质，称之为“荷叶效应 (Lotus-effect)”。实际上，荷叶表面密布的参差不齐的刚毛构成荷叶表面主要的脱附结构。蜥脚体表有管道与体表下方的分泌腺体相通。这些腺体的分泌液具油性，在蜥脚刚毛上形成油质层，有一定的憎水性，无疑地加强了刚毛的脱附作用，并可推测分泌液可通过刚毛中空的内腔和芽刺内侧的微孔涂向毛的周身。

壁虎的刚毛构筑形态是有利于粘附的。壁虎脚趾皮瓣上的刚毛排列密集、形态规范、方向规则、尖端弯曲而分支，受到基底肌肉组织的支配。这些刚毛在插入所接触表面中形成极大的粘附力 (Antumn et al., 2000, 2002)。壁虎刚毛尖端分支的形态扩大了脚底与表面的附着面积。Antumn 和他的同事用微电子机械传感器测量了壁虎脚单根刚毛的粘附力，他们排除了吸力、胶合力、以至静电作用力的可能，认为绒毛上的卷须和物体表面贴得非常近时，它们可以产生微弱的分子间作用力。这种类似于范德瓦尔斯 (van der Waals) 力的作用力 (Antumn et al., 2000)。近年测量单根壁虎刚毛的粘附力时发现，刚毛必须和接触对象有一定相对滑动时才能测到附着力。这一实验过程与 Van der Waals 力的作用机制并非完全吻合 (Antumn et

al., 2002)。我们在实验中也发现, 离体刚毛的粘附力只在牵拉过程中出现 (Dai and Stannislav, 2002)。壁虎脚上刚毛的形态和构筑为科学家制造“人工合成的壁虎粘附剂”提供了重要的蓝图。Geim et al. (2002) 和 Sitti* 等人制备壁虎的仿生刚毛具有一定的粘附效应, 但都不及壁虎刚毛的理想, 这可能是仿生刚毛的结构没有顾及壁虎刚毛尖端的微结构。

从壁虎刚毛内充满内容物的现象推测, 壁虎刚毛可能是一个细胞样结构, 也即是说, 壁虎刚毛是刚毛细胞的突起。如是, 壁虎刚毛应称为“绒毛”。那么, 壁虎刚毛的粘附机制中是否具有生物学因素? 例如: “绒毛”内物质是否具有可收缩性? 刚毛细胞活动是否产生生物电变化? 这是我们正在研究的问题。如是, 壁虎刚毛的黏附机理将不会仅仅是范德瓦尔斯 (van der Waals) 力, 可能有生物学机制参与。

参考文献 (References)

- Autumn K, Liang YA, Hsieh ST, Zesch W, Chan WP, Kenny TW, Fearing R, Full RJ, 2000. Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature* 405: 681–685.
- Autumn K, Sitti M, Liang YA, Peattie AM, Hansen WR, Sponberg S, Kenny TW, Fearing R, Israelachvili JN, Full RJ, 2002. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *PNAS* 99 (19): 12 252–12 256.
- Cheng H, Chen MS, Sun JR, 2003. Histological structure of the dung beetle *Copris ochus* Motschulsky integument. *Acta Entomologica Sinica* 46 (4): 429–435 (In Chinese).
- Cheng H, Sun JR, Li JQ, Ren LQ, 2002. Structure of the integumentary surface of the dung beetle *Copris ochus* Motschulsky and its relation to non-adherence of substrate particles. *Acta Entomologica Sinica* 45 (2): 175–181 (In Chinese).
- Dai ZD, Stannislav NG, 2002. Roughness-dependent friction force of the tarsal claw system in the beetle *Pachnoda marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae). *J. Exp. Bio.* 205: 2 479 – 2 488.
- Geim AK, Dubonos SV, Grigorieva IV, Novoselov KS, Zhukov AA, Shapoval SY, 2002. Microfabricated adhesive mimicking gecko feet-hair. *Nature Materials* 2 (7): 461–463.
- Li LH, 1992. Research status of application of special robot in the U. K. *Information of Robot* 3: 2 342–2 347 (In Chinese).
- Neinhuis C, Barthlott W, 1997. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany* 79 (6): 667–677.
- Ren LQ, Tong J, Li JQ, Cheng BC, 2001a. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: a review. *J. Agriculture Engineering* 79 (3): 239–263.
- Ren LQ, Qian C, Tong J, Cheng BC, 2001b. Reducing adhesion of soil against loading shovel using bionic electro-osmosis method. *J. Terramechanics* 38 (4): 211–219.
- Sun JR, Cheng H, Cong Q, Li JQ, Cheng BC, Ren LQ, 2001. Bionic study on the dung beetle *Copris ochus* Motschulsky for reduction of soil adhesion. *Acta Biophysica Sinica* 17 (4): 785–793 (In Chinese).
- Sun JR, Li JQ, Cheng H, Dai ZD, Ren LQ, 2004. Restudies on body surface of dung beetle and application of its bionics flexible technique. *J. Bionics Engineering* 1: 53–60.
- Vincent JFV, Mann DL, 2002. Systematic technology transfer from biology to engineering. *Philosophical Transaction of the Royal Society* 360 (1 791): 159–173.
- Xin JL, 1986. *Agrozoology*. Beijing: Science Press (In Chinese).
- Zaaf A, Damme RV, Herrel A, Aerts P, 2001. Spatio-temporal gait characteristics of level and vertical locomotion in a ground-dwelling and a climbing gecko. *J. Experimental Biology* 204 (7): 1 233–1 246.
- 程红, 陈茂生, 孙久荣, 2003. 臭蜚螂体壁结构的组织学分析. *昆虫学报* 46 (4): 429–435.
- 程红, 孙久荣, 李建桥, 任露泉, 2002. 臭蜚螂体壁体表结构及其与减粘脱附关系. *昆虫学报* 45 (2): 175–181.
- 李鲁虹, 1992. 英国特种机器人的应用研究情况. *机器人情报* 3: 2 342–2 347.
- 孙久荣, 程红, 丛茜, 李建桥, 陈丙聪, 任露泉, 2001. 蜚螂减粘脱附的仿生学研究. *生物物理学报* 17 (4): 785–793.
- 忻介六, 1986. *土壤动物学*. 北京: 科学出版社.

* Sitti M, Fearing R, 2002. Nanomolding based fabrication of synthetic gecko foot-hair. *IEEE Conference on Nanotechnology*, Washington, D.C., August, 26–28.