

研究论文 ORIGINAL PAPERS

针毛形态分化与毛被隔热性能关系研究
——以北美水貂为例穆佳童¹, 刘微¹, 张洪福², 崔靛玉¹, 韩松霖¹, 杨淑慧^{1*}, 徐艳春^{1*}(1. 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨 150040;
2. 东北林业大学土木与交通学院, 哈尔滨 150040)

稿件运行过程

收稿日期: 2024-05-23

修回日期: 2024-05-25

关键词: 北美水貂;
毛被;
针毛;
形态分化;
隔热性能**Keywords:** Amercian Mink (*Neovison vison*);
Pelage;
Guard hair;
Morphological differentiation;
Thermal insulation

中图分类号: S865.2+2

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2025)-03-0555-09

DOI: 10.12375/ysdwxb.20250309

摘要

为了揭示哺乳动物针毛分化的适应性意义,探讨针毛在哺乳动物毛被隔热性中的作用,以野生型北美水貂(*Neovison vison*)为实验样本,应用动物毛皮传热系数测试装置,测定当年采剥的雄性北美水貂冬皮、夏皮、去针毛冬皮样本在不同风速、温度条件下的传热系数(k),同时测量针毛长度(L_g)、毛密度(D_h)以及针毛倾角(θ),量化毛形态指标与传热系数之间的关系。结果表明:自然状态下的冬皮传热系数显著低于剪除针毛的冬皮($P < 0.01$),突出于绒毛层的针毛对毛被的抗风隔热性能有重要作用。针毛长度与传热系数有着极强的负相关关系($P < 0.05$),针毛越长,高于绒毛层的部分越长,传热系数越小,毛被的隔热性能越强;冬皮的传热系数显著低于夏皮($P < 0.01$),与针毛倾角存在显著负相关关系($P < 0.05$)。这说明,除了绒毛层的厚度以外,针毛倾角通过影响毛被外层针毛有效长度及其对外层空气的扰动程度来影响毛被的隔热性能。综合以上结果可以得出,针毛本身密度较低,对毛被的隔热性能没有直接贡献,但其通过突出于毛被,在有风条件下,对毛被外层的空气产生扰动,形成一层紊流,有效地保护了下层毛被中空气层的稳定性。针毛长度和性状的分化可以增加紊流层的复杂性,提高其诱导出来的隔热效能。这一认识揭示了开阔生境中的哺乳动物针毛较长,而郁闭生境中针毛较短现象的原理,为进一步理解毛被作为隔热器官的形态和功能演化提供新的视角,同时这种结构和功能的关系也暗示了隔热结构设计的仿生学意义。

基金项目: 新一轮黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目(2023)

第一作者简介: 穆佳童(1997—),男,硕士研究生;主要从事野生动物产品形成机理研究。E-mail:1578958684@qq.com

*通信作者: 杨淑慧, E-mail:474568251@qq.com; 徐艳春, E-mail:xu_daniel@163.com

A Study on the Relationship Between Morphological Differentiation of Guard Hair and Thermal Insulation of Pelage: an Example from the American Mink

MU Jiatong¹, LIU Wei¹, ZHANG Hongfu²,
CUI Liangyu¹, HAN Songlin¹, YANG Shuhui^{1*}, XU Yanchun^{1*}

(1. College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: This study took the American mink (*Neovison vison*) as an example, investigated the role of guard hair morphology in thermal insulation property of mammalian pelage and explored adaptive evolution significance of morphological differentiation. The experiments were performed on a pelage heat transfer coefficient (k) testing platform under different wind speed and temperature using winter pelage, summer pelage and winter pelage with guard hair shaving. Meanwhile, morphological parameters of pelage namely guard hair length (L_g), obliquity (θ) and down hair density (D_h) were measured and correlations between the parameters and k were tested. Results showed the k of the natural (untreated) winter pelage under different wind speed and temperature was significantly lower than the winter pelage with guard hair shaving ($P < 0.01$), demonstrating the guard hair contributes to thermal insulation. L_g showed very significant negative correlation with k ($P < 0.05$), the greater the L_g and the longer that guard hair outstanding the fur, the smaller the k . This further indicates that L_g is essential to heat transfer performance of pelage. Furthermore, the k of winter pelage was significantly greater than that of summer pelage ($P < 0.01$) and k was also negatively associated with θ of guard hair ($P < 0.05$). This suggests that, besides the fur (down hair), the obliquity angle of guard hair contributes to thermal insulation through disturbing air flow at the upper layer of the pelage to facilitate the immobilization of air held in down layer. The above results suggest that the guard hair has negligible contribution to thermal transfer of mammalian pelage due to the small density, however, it improves the immobilization of air held in down layer through disturbing the air flow at upper layer so as to improve thermal insulation performance. Morphological differentiation of guard hair in length and shape can improve the induced thermal insulation. Our finding helps explaining the phenomena that mammals in open habitats often have longer guard hair than those in closed habitats, providing a new angle to understand the morphology-function evolution of mammalian pelage. Meanwhile, it also provides bionic implication for designing thermal insulation structure with reference to the structure and function of guard hair.

毛被是哺乳动物覆盖体表的特征性结构,由纤细、柔软而弯曲的绒毛和粗而直的针毛构成。从结构上讲绒毛层是一种多孔材料,容纳的空气难以流动。空气的导热性较差,使毛被中的热传递较少,从而达到隔热的效果^[1],并且绒毛的密度和长度越大,孔隙越小,其隔热效果越好^[2-3]。这一特性驱动了毛被的适应性进化,寒冷地区动物的毛被相较温暖地区的更为厚实^[4-5]。这些结构与性能的关系已经在建筑和设备保温、隔热等仿生学方面得到应用^[6-7]。然而,毛被中针毛的占比通常在4%以下,且毛干粗

而直,对隔热性能的贡献较小^[8]。毛被隔热性及其仿生学的研究中都忽略了针毛。大量观察发现,不同物种针毛的长度与绒毛层的厚度相比有着很明显的分化,荒漠、草原等开阔生境中的动物较之郁闭生境(森林)的动物有更长的针毛,被称为峰毛^[9],如黄鼬(*Mustela sibirica*)、猞猁(*Lynx lynx*)和艾鼬(*Mustela eversmannii*)等广布种,生活在平原、荒漠的种群针毛较长,甚至峰毛发达,而生活在森林或覆盖度较高环境的种群针毛较短。长期以来人们未曾合理解释这种差异的成因。

地表风力是森林与草原、荒漠等生境差异最明显的生态因子之一,前者因为树木密集,地表风力较小,而后者风力较大。对于地栖动物而言,风力大小与毛被的导热能力密切相关,随着风力加大,毛被的导热性也不断增加,反之亦然^[10-11]。此外,夏季毛被的导热性高于冬季毛被^[12-13],当风速超过2.8 m/s时,夏季毛被的导热性随风速的增加而增加得更快,冬季毛被则增加较慢^[14]。冬、夏毛被的主要差别在于毛被厚度和针毛与皮肤的夹角。冬季绒毛层较厚,使针毛与皮肤的夹角变大,而夏季绒毛层较薄,针毛的角度较小。单纯就毛被而言,其致密程度在冬、夏季是一定的,那么其导热性与风速的关系应该只受到厚度和针毛相对长度的影响。

综合以上情况,我们提出一个针毛在毛被隔热性中作用的假设:针毛毛头突出于毛被,在风中会产生无规则的振动,扰动空气,使其流动不再沿着原来的方向,而是在各个方向进行混乱运动,形成一个稳定存在的紊流层。紊流层使其下面绒毛层表层的空

气更加稳定,从而达到隔热的效果。紊流层的厚度取决于针毛突出毛被的长度。因此风速越大的生境会驱动动物产生更长的针毛,反之亦然;夏季针毛与皮肤夹角变小,气流对毛头的扰动明显减小,紊流层变薄,绒毛层的静止空气不能得到有效保护,从而大大降低隔热效果。

1 材料与方法

1.1 实验材料

北美水貂(*Neovison vison*)是典型的毛皮动物,其毛被由细密的绒毛和绒针毛、披针毛、直针毛等高度分化的针毛组成。野生型的毛被中直针毛明显突出于绒毛层,披针毛和绒针毛填充于其下。这种复杂的结构符合上述假说中的毛被特点(图1)。因此,本研究以北美水貂的毛被为例,测定在不同风速和温度下,针毛的存在与否以及不同的倾斜角度对毛被导热性的影响,对假设进行检验。

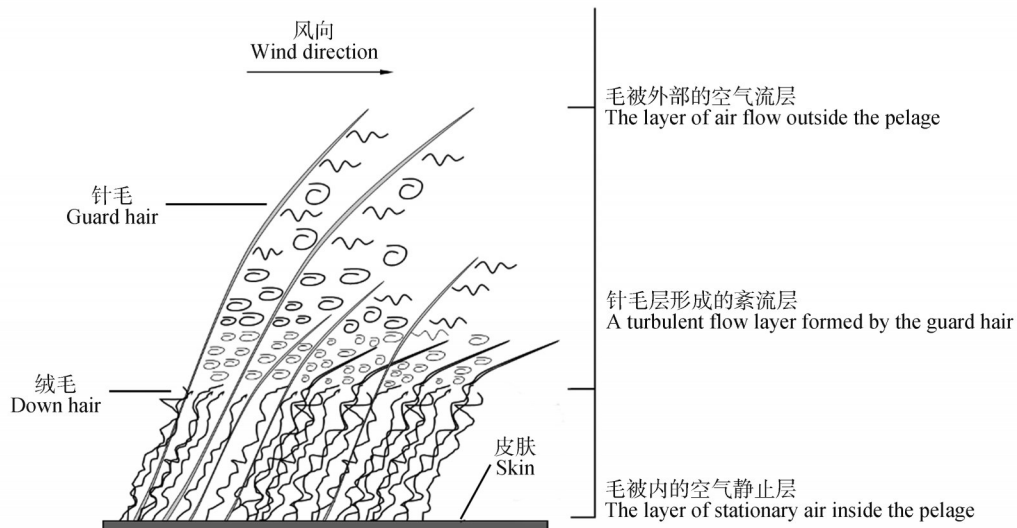


图1 哺乳动物针毛在毛被隔热性中的作用示意图(穆佳童 绘制)

Figure 1 Diagram of the role of guard hair in thermal insulation of mammalian pelage in the wind (Drawn by MU Jiatong)

选择人工饲养的雄性野生型(毛被结构特点与野生水貂相同)北美水貂的冬皮(1—2月)和夏皮(6—7月)。在养殖场中,处死水貂后剥取毛皮,随后刮去皮下脂肪和残肉,在40~50℃环境下晾晒烘干,在室温、干燥条件下保存备用。随机抽选冬皮、夏皮各3张,在臀部中央切取100 mm×50 mm的矩形样方作为传热系数测试的样品。在该样方周围取完整的针毛、绒毛各30根,测量毛长度,精确到

0.1 mm;在臀部中央切取20 mm×20 mm的矩形样方,测定毛密度。同时,取2 mm×20 mm的皮条用于测量针毛与皮板的夹角,即针毛倾角。上述100 mm×50 mm的矩形冬皮样方在完成传热系数(k)测试后,用电动推子一次性剪短针毛,使其与绒毛层处于一个高度(图2),再次测定传热系数,比较有无针毛结构对毛被隔热性能的影响。

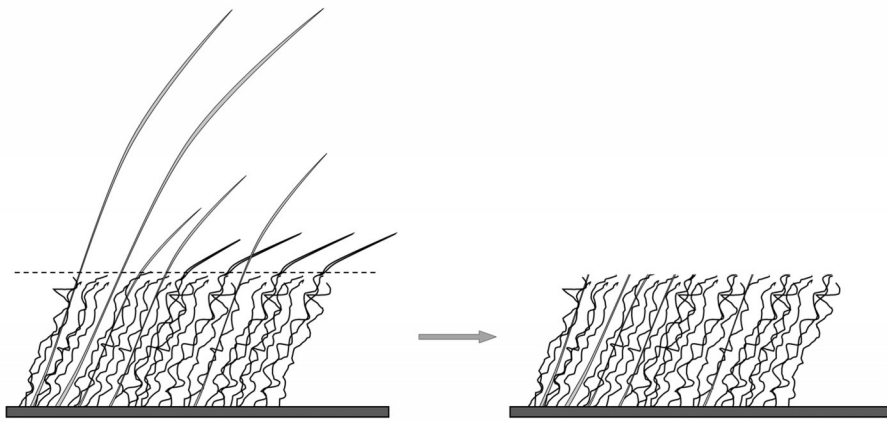


图2 在冬皮上剪除针毛的操作方法示意图(穆佳童 绘制)

Figure 2 Diagram of guard hair shaving from the winter pelage (Drawn by MU Jiatong)

为建立针毛长度与传热系数之间的回归方程,随机抽选冬皮矩形样方1块,用电动推子分多次剪短针毛,每次修剪后测量针毛长度,并测定不同针毛长度水平的传热系数。

1.2 实验方法

1.2.1 毛被隔热性能测定

用传热系数衡量毛被的隔热性能,系数越小,毛被传递的热量越少,隔热性能越好;相反则隔热性能越差。采用动物毛皮传热系数测试平台对样皮进行传热效应测定^[15-17]。在实验前,开启风机和制冷压缩机运行一段时间,以便排除风道中的湿气和潜热;设定恒温水浴箱温度为40℃,待恒温板温度稳定后,将测试样皮自然铺平,并使被毛处于自然蓬松的状态。将样本置于传热系数测试平台的测试槽中,用有机玻璃边框压住被测样皮,使其紧密贴合恒温板^[18-19]。实验设置10、0、-10℃三种环境温度,通过调节风机的输出功率和风道风门,将测定风速设定在1~4 m/s,分别在3种环境温度下测试样皮在1、2、3、4 m/s四种风速条件下的热流密度,并根据公式计算出对应的传热系数^{[20]5-15},

$$k = \frac{q}{\Delta t}。$$

式中: q 为热流密度,单位 W/m^2 ; Δt 为毛被上下表面的温度差,单位 $^{\circ}C$ 。设备开启2 h后可以输出稳定数据,故此时间设置为4 h,收集2~4 h的数据作为实验数据,采集数据的时间间隔为90 s。

1.2.2 毛密度的测量

为明确毛密度对传热系数的影响程度,计算二者之间的相关性,需要对针毛、绒毛密度进行测量。

毛密度(D_h)定义为单位皮肤面积上毛发的总数,其倒数为1根毛所占皮肤的面积,公式为

$$D_h = \frac{N_h}{A_q} = \frac{1}{A_h}。$$

式中: N_h 为给定样方中毛的数量, A_q 为皮肤样方的面积, A_h 为平均每根毛所占的皮肤表面积。任意一根毛所占皮肤的表面积(A_i)可以用这根毛和与其最相邻的2根毛组成的三角形的面积的2倍来估算。在实测中,测定 n 个任意两根最相邻的毛之间的距离,再在满足三角形两边之和大于第三边的条件下,从这组距离中任意抽取3个距离组成三角形,根据海伦公式计算 A_i ,

$$A_i = \sqrt{p(p - a_i)(p - b_i)(p - c_i)}。$$

式中: a_i, b_i, c_i 为一组构成三角形3条边的任意两根相邻毛的距离; p 为三角形周长的一半,即 $(a_i + b_i + c_i)/2$,则 A_h 即为 n 个 A_i 的平均值。详细步骤见文献[21]。用此方法测算出针毛密度(D_g)与绒毛密度(D_d)。

1.2.3 毛长度和绒毛卷曲度的测量

毛伸直长度的测量(L):用尖镊子将针毛、绒毛从皮肤中完整地拔出,置于培养皿中,滴上1滴清水,用镊尖或解剖针将毛挑直,测量从毛根到毛尖端的长度。用精度为0.5 mm的直尺测量针毛、绒毛的伸直长度(L_g, L_d)。

毛自然长度的测量(N):在自然状态下,利用精度为0.5 mm直尺测量针毛、绒毛的自然长度(N_g, N_d)。

绒毛卷曲度(C_d)计算公式为,

$$C_d = (L - N)/L \times 100%。$$

1.2.4 针毛倾角的测量

针毛倾角(θ)($0 \sim 90^\circ$)影响针毛的姿态,也决定了针毛突出毛被的实际高度。把 $2 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的皮条轻轻抖动使被毛自然蓬松,把正侧面朝上放在解剖镜的载物台上,在解剖镜(OLYMPUS,日本)下观察针毛的倾斜度并拍照,用图像分析软件OLYMPUS cellSens中的量角工具测量 θ 的大小。由此,针毛突出毛被的实际高度(H)为:

$$H = (L_g - L_d) \times \sin \theta。$$

1.2.5 数据分析方法

用Excel和SPSS 26.0软件进行数据处理与分析。首先用K-S或S-W检验数据的正态性,用莱文方差分析法检验样本方差的齐性。对于分布正态、齐性方差的样本用独立样本 t 检验比较冬皮和夏皮的传热系数、热流密度之间的差异显著性,以及冬皮和夏皮毛形态指标之间的差异显著性,显著水平 $\alpha = 0.05$ 。用配对样本 t 检验比较冬皮剪去针毛前后的传热系数、热流密度之间的差异显著性,显著水平 $\alpha = 0.05$ 。用Pearson相关系数或Spearman相关系数计算传热系数与毛结构指标之间的相关性。

Pearson用于正态分布或近似正态分布的数据,Spearman用于非正态分布的数据。

2 结果与分析

2.1 毛被传热效能

K-S和S-W检验表明,冬皮($P_k = 0.138, P_q = 0.997$)、夏皮($P_k = 0.356, P_q = 0.991$)、去针毛冬皮($P_k = 0.147, P_q = 0.513$)在不同测试环境下的热流密度和传热系数皆符合正态性分布;冬皮与夏皮的热流密度和传热系数也满足方差齐性($P_q = 0.963, P_k = 0.122$)。在不同测试环境中,北美水貂冬皮、夏皮和去针毛冬皮热流密度如表1所示。总体上,不考虑风速和温度的变化,夏皮的热流密度都显著大于冬皮($|t| = 2.909, P = 0.008$)。在 $10、0、-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 三种温度序列中,无论流经表面的风速多大,热流密度都随温度上升呈现出显著的下降趋势(图3A)。在 $1、2、3、4 \text{ m/s}$ 风速条件下,无论温度如何,热流密度均随着风速的加大呈显著的上升趋势:冬皮和夏皮上升的速度较慢,但是剪除针毛的冬皮上升速度大幅提高(图3C),说明针毛的有无对热流密度的影响显著。

表1 不同风速条件下北美水貂毛被热流密度的变化趋势
Table 1 Heat flux of Amercian mink pelage under different wind speed

样本 Sample	风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) Wind speed	热流密度(q)/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) Heat flux		
		$10 \text{ }^\circ\text{C}$	$0 \text{ }^\circ\text{C}$	$-10 \text{ }^\circ\text{C}$
冬皮 Winter pelage	1	102.15 ± 4.05	143.15 ± 1.91	163.08 ± 9.67
	2	115.34 ± 2.93	150.04 ± 1.99	170.59 ± 3.15
	3	125.90 ± 2.53	156.04 ± 3.60	187.43 ± 0.93
	4	131.00 ± 0.79	172.82 ± 11.33	198.96 ± 1.87
夏皮 Summer pelage	1	137.47 ± 7.10	155.42 ± 2.72	191.12 ± 2.72
	2	151.64 ± 4.18	179.50 ± 1.30	207.80 ± 3.07
	3	170.54 ± 3.30	188.15 ± 2.67	225.28 ± 2.24
	4	188.75 ± 3.19	205.49 ± 4.85	242.17 ± 1.52
去针毛冬皮 Winter pelage guard hair shaved	1	115.70 ± 4.36	153.65 ± 2.45	171.60 ± 1.47
	2	123.72 ± 2.35	167.00 ± 3.94	203.98 ± 2.06
	3	138.51 ± 2.68	178.94 ± 3.55	246.49 ± 12.82
	4	145.25 ± 0.75	202.83 ± 1.66	270.60 ± 3.85

传热系数系由热流密度计算而来,因此,也表现出与之相似的趋势,即不考虑风速和温度的变化,夏皮

的传热系数都显著大于冬皮($|t| = 4.013, P = 0.001$),去针毛冬皮的传热系数显著大于未处理的冬皮

($|t| = 19.917, P < 0.001$)。同时,在 10、0、-10 °C 三种温度序列中,3 种样本的传热系数未出现显著的变化(图 3B);在 1、2、3、4 m/s 风速条件下,不论温度如何,传热系数均随风速的加大呈显著上升趋势,但冬皮和夏皮折线上升的斜度较小,去针毛冬皮上升速度较快(图 3D)。这说明针毛的有无对隔热能力有着非常明显的影响。传热系数主要由样本的几何参数决定,环境温度对其影响不大,空气流速对传热系数

有巨大影响^{[20]183-211}。在 10、0、-10 °C 三种温度下,风速在 1.0 m/s 的条件下,去针毛冬皮的传热系数比冬皮分别提高 22.9%、20.3% 和 22.6%;当风速达到 4 m/s 时,传热系数仍分别提高 9.6%、10.2% 和 9.2%(表 2)。另外,推断随着风速的不断增大或超过某一限度后,针毛结构被气流破坏,针毛对隔热能力的贡献度越来越小。

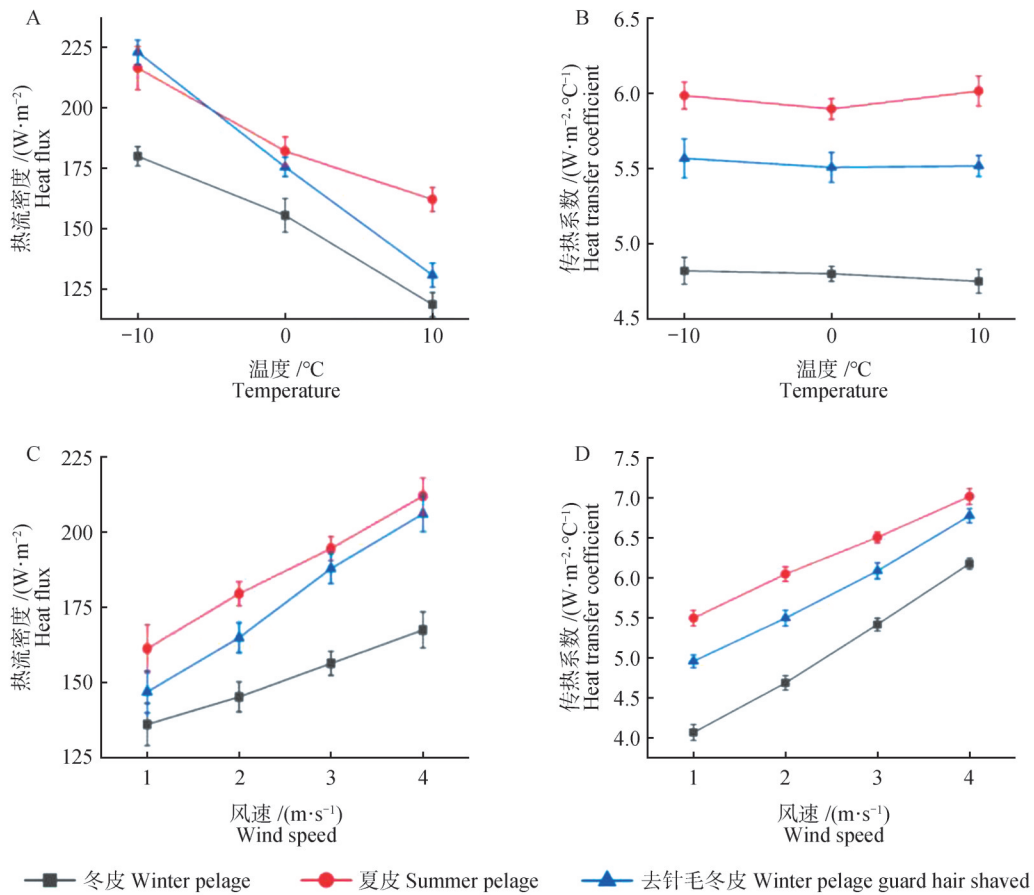


图3 影响北美水貂毛被传热系数与热流密度的因素

Figure 3 Factors affecting heat transfer coefficient and heat flux of American mink pelage

2.2 毛被结构分析

2.2.1 毛密度与绒毛卷曲度

冬皮针毛密度(D_g)为(6.6 ± 1.0)根/mm²(6.6~6.7根/mm²),绒毛密度(D_d)为(410.5 ± 23.5)根/mm²(408.2~415.6根/mm²);夏皮 D_g 为(6.0 ± 0.8)根/mm²(6.0~6.1根/mm²), D_d 为(390.5 ± 20.7)根/mm²(389.2~392.7根/mm²)。经S-W检验,各样本的毛密度符合正态分布($P_{summer,g} = 0.187, P_{winter,g} = 0.265; P_{winter,d} = 0.191, P_{summer,d} = 0.185$),各样本间满足方差

齐性($P_g = 0.120, P_d = 0.386$)。独立样本t检验显示,冬皮的针毛和绒毛密度都显著高于夏皮(针毛: $|t| = 3.566, P = 0.001$;绒毛: $|t| = 4.948, P < 0.001$)。

冬皮绒毛卷曲度(C_d)为(8.78 ± 1.29)%(7.7%~10.5%),夏皮 C_d 为(7.77 ± 0.84)%(6.66%~8.68%)。经S-W检验,各样本的绒毛卷曲度符合正态分布($P_{winter} = 0.410, P_{summer} = 0.835$),各样本间满足方差齐性($P = 0.332$)。独立样本t检验显示,冬皮 C_d 显著大于夏皮($|t| = 1.316, P = 0.036$)。

表2 不同风速条件下北美水貂毛被传热系数的变化趋势

Table 2 Heat transfer coefficient of Amercian mink pelage under different wind speed

样本 Sample	风速/(m·s ⁻¹) Wind speed	传热系数(k)/(W·m ⁻² ·°C ⁻¹) Heat transfer coefficient		
		10 °C	0 °C	-10 °C
冬皮 Winter pelage	1	4.01 ± 0.17	4.09 ± 0.06	4.11 ± 0.22
	2	4.67 ± 0.14	4.69 ± 0.07	4.70 ± 0.08
	3	5.37 ± 0.09	5.45 ± 0.14	5.44 ± 0.06
	4	6.15 ± 0.08	6.17 ± 0.21	6.22 ± 0.07
夏皮 Summer pelage	1	5.46 ± 0.31	5.47 ± 0.11	5.56 ± 0.10
	2	6.10 ± 0.17	5.94 ± 0.07	6.10 ± 0.12
	3	6.59 ± 0.15	6.45 ± 0.09	6.48 ± 0.08
	4	7.12 ± 0.09	6.95 ± 0.22	7.00 ± 0.06
去针毛冬皮 Winter pelage guard hair shaved	1	4.93 ± 0.14	4.92 ± 0.09	5.04 ± 0.07
	2	5.50 ± 0.09	5.44 ± 0.11	5.55 ± 0.07
	3	6.09 ± 0.15	6.08 ± 0.13	6.09 ± 0.29
	4	6.74 ± 0.05	6.80 ± 0.06	6.79 ± 0.09

2.2.2 毛长度

冬皮针毛长度(L_g)为(27.00 ± 2.31)mm(26.6 ~ 27.6 mm),绒毛长度(L_d)为(17.61 ± 1.23)mm(17.4 ~ 17.9 mm);夏皮 L_g 为(19.48 ± 1.81)mm(18.9 ~ 20.0 mm), L_d 为(12.62 ± 1.06)mm(12.4 ~ 13.0 mm)。经S-W检验,各样本的针毛、绒毛长度符合正态分布($P_{winter,g} = 0.536, P_{summer,g} = 0.213, P_{winter,d} = 0.743, P_{summer,d} = 0.426$),各样本间满足方差齐性($P_g = 0.209, P_d = 0.692$)。独立样本t检验显示,冬皮的 L_g 和 L_d 都显著大于夏皮($L_g: |t| = 24.333, P < 0.001; L_d: |t| = 29.062, P < 0.001$)。

2.2.3 针毛倾角

冬皮针毛倾角(θ)为(51.0 ± 4.3)°(50.5° ~ 51.8°),夏皮为(40.2 ± 4.0)°(39.8° ~ 40.5°)。各样本 θ 符合正态分布($P_{winter} = 0.782, P_{summer} = 0.179$),样本间满足方差齐性($P = 0.955$)。独立样本t检验显示,冬皮 θ 显著大于夏皮($|t| = 14.272, P < 0.001$),意味着冬皮的针毛更挺立。由此计算出针毛突出毛被的实际高度,冬皮为(7.36 ± 0.47)mm(6.72 ~ 8.02 mm),夏皮为(4.35 ± 0.43)mm(3.78 ~ 4.94 mm)。

2.3 传热系数与毛被形态指标的相关性

以Pearson相关性分析检验冬皮、夏皮的传热系数与毛被形态指标的关系(表3)。除夏皮针毛密度外,传热系数与5项毛被结构指标都表现出显著或极显著的负相关关系($P = 0.002 \sim 0.020$)。其中冬

皮传热系数与针毛长度的相关性最大, $|r| = 0.727$,与针毛倾角的相关性次之, $|r| = 0.534$,其余结构指标虽然达到显著水平,但相关系数均在0.400以下。夏皮中这两项指标与传热系数的相关性也相对较高, $|r|$ 分别为0.639和0.609,但相比冬皮,夏皮所有指标的 $|r|$ 波动幅度均较小。在传热系数与针毛长度之间构建线性回归方程: $k = -0.218L_g + 11.182$ ($R^2 = 0.884, P = 0.001$,图4)。

表3 北美水貂毛被的传热系数与毛结构指标的相关性(Pearson相关系数)

Table 3 Correlation (Pearson coefficient r) between heat transfer coefficient and structural indices of Amercian mink pelage

毛结构指标 Structural indices of pelage	冬皮 Winter pelage		夏皮 Summer pelage	
	r	P	r	P
针毛长度(L_g) Guard hair length	-0.727	0.015*	-0.639	0.002**
绒毛长度(L_d) Down hair length	-0.396	0.004**	-0.557	0.016*
针毛密度(D_g) Guard hair density	-0.328	0.020*	-0.434	0.159
绒毛密度(D_d) Down hair density	-0.330	0.019*	-0.567	0.014*
针毛倾角(θ) Guard hair obliquity	-0.534	0.015*	-0.609	0.013*

注: *. 相关显著, $\alpha = 0.05$; **. 相关极显著, $\alpha = 0.01$ 。

Note: *. Moderately significant correlation, $\alpha = 0.05$; **. Highly significant correlation, $\alpha = 0.01$.

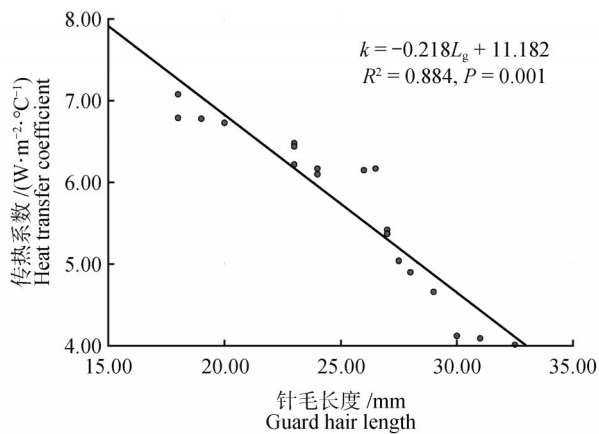


图4 传热系数(k)与针毛长度(L_g)的关系

Figure 4 Relationship between heat transfer coefficient (k) and guard hair length (L_g)

3 讨论与结论

毛被作为哺乳动物体表的隔热器官,在形态上表现出显著的多样性。针毛突出于纤细的绒毛之上,针毛的膨大顶端构成了毛被的外层结构。值得注意的是,即使是同一部位的针毛,其粗细、长短和毛干卷曲度等方面也存在分化^[9]。本研究测算出野生型北美水貂背臀部针毛只占总毛数的1.5%(夏皮)~1.6%(冬皮)。尽管针毛在毛被上的占比较小,但是通过本研究揭示了针毛在毛被隔热性能中具有不可忽视的作用。

第一,绒毛层是隔热功能的主体。该层由细密卷曲的绒毛构成,形成多孔结构。其孔隙度与毛密度有关,而隔热层厚度取决于绒毛长度。研究发现,夏皮绒毛密度为(390.5 ± 20.7)根/ mm^2 ,显著低于冬皮[(410.5 ± 23.5)根/ mm^2 ; $|t| = 4.948, P < 0.001$],夏皮绒毛长度为(12.62 ± 1.06)mm,显著低于冬皮[(17.61 ± 1.23)mm; $|t| = 29.062, P < 0.001$]。同时,夏皮绒毛卷曲度也显著低于冬皮($|t| = 1.316, P = 0.036$)。高密度、高长度和高卷曲度的绒毛层有利于滞留更多的静止空气,进而提升毛被的保温性能。这解释了为何冬皮在不同温度和风速条件下的传热系数均低于夏皮($|t| = 4.013, P = 0.001$)。

第二,针毛通过抗风机制强化隔热性能。本研究发现,毛被的传热系数主要受几何参数和风速的影响,与环境温度关联较弱。风速是影响毛被隔热性能的关键因子,抗风能力越强,毛被的保温性能越优秀。随风速增加,去针毛冬皮的传热系数上升速率显著高于完整冬皮,表明突出于绒毛层的针毛有

助于抵抗风力对热量的耗散。

第三,针毛通过调控毛被表层气流扰动改善隔热性能。对比冬皮和夏皮的针毛结构发现:夏皮针毛倾角显著小于冬皮,导致其突出毛被的实际高度仅为冬皮的1/1.7($|t| = 14.272, P < 0.001$)。冬皮的传热系数显著低于夏皮($|t| = 4.013, P = 0.001$),并且冬皮的传热系数与针毛长度的 $|r|$ 达到0.727,而夏皮为0.639。这说明针毛长度与针毛倾角共同影响了针毛突出于毛被部分的真实高度。针毛倾角与长度对毛被隔热性能有显著影响。

针毛形态的分化是一种生态适应性机制。数据分析表明,针毛长度与传热系数呈极显著的负相关关系($R^2 = 0.884, P = 0.001$,图4)。这一规律揭示了不同生境中动物毛被形态的分化机制:在风力强劲的荒漠、草原等开阔生境中,动物针毛普遍较长,甚至极度延长特化为峰毛;而在风力较弱的森林、灌丛等郁闭生境中,动物针毛较短。过去一个世纪以来,关于哺乳动物对寒冷环境的生理适应开展了大量的研究,但主要聚焦在机体能量支出、产热和皮下脂肪积累等方面^[22-24],对毛被这一体外隔热器官的关注相对较少。本研究为进一步认识毛被的生态适应性提供了一个新的视角:在寒冷环境中,毛被与皮下脂肪虽同具隔热功能,但是作用机制不同。皮下脂肪可用于产热并被逐渐消耗^[25],从而逐渐失去隔热能力;而毛被则通过结构优化(如针毛增长、绒毛增厚)减少机体与环境间的热传递,形成必不可少的补偿。此外,毛被和脂肪的形成依赖不同的营养策略:脂肪主要是碳水化合物转换而来^[26],而毛被是蛋白质(角蛋白)转化而来,二者的微妙平衡需要动物在食性、营养对策和觅食行为等一系列的营养生态位要素之间进行有效的权衡。本研究结果为深化动物生理生态学,特别是营养生态学的研究提供了新的视角,也为防风保温材料的设计提供了仿生学理论借鉴。

参考文献:

- [1] HES L. Analysing the thermal properties of animal furs for the production of artificial furs [M]//ABBOTT A, ELLISON M. Biologically inspired textiles. Abington: Woodhead Publishing, 2008: 150-167.
- [2] WANG X J, GU W B, LU H. Effects of three-dimensional pore structure on effective thermal conductivities of thermal insulation materials [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 139: 106523.

- [3] LIU H, TIAN Y, JIAO J H, *et al.* Thermal conductivity modeling of hollow fiber-based porous structures for thermal insulation applications[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2022, 575: 121188.
- [4] GLANVILLE E J, MURRAY S A, SEEBACHER F. Thermal adaptation in endotherms: climate and phylogeny interact to determine population-level responses in a wild rat[J]. *Functional Ecology*, 2012, 26(2): 390-398.
- [5] GUERRERO A I, ROGERS T L. From low to high latitudes: changes in fatty acid desaturation in mammalian fat tissue suggest a thermoregulatory role[J]. *BMC Evolutionary Biology*, 2019, 19(1): 155.
- [6] IJJADA N, NAYAKA R R. Review on properties of some thermal insulating materials providing more comfort in the building [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 58: 1354-1359.
- [7] McCAFFERTY D J, PANDRAUD G, GILLES J, *et al.* Animal thermoregulation: a review of insulation, physiology and behaviour relevant to temperature control in buildings[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2018, 13(1): 011001.
- [8] 吴莲, 周裕婷, 吴樊花, 等. 压力厚度法测量獭兔被毛密度[J]. *中国养兔*, 2012(4): 9-12.
WU L, ZHOU Y T, WU F H, *et al.* Study on the pressure-thickness method for determination of hair density of rex rabbit [J]. *Chinese Journal of Rabbit Farming*, 2012(4): 9-12.
- [9] 张伟, 景松岩, 徐艳春. 毛皮学[M]. 2版. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2002: 25-27.
ZHANG W, JING S Y, XU Y C. *Furology*[M]. 2nd ed. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2002: 25-27.
- [10] TREGEAR R T. Hair density, wind speed, and heat loss in mammals [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1965, 20(4): 796-801.
- [11] BOYLES J G, BAKKEN G S. Seasonal changes and wind dependence of thermal conductance in dorsal fur from two small mammal species (*Peromyscus leucopus* and *Microtus pennsylvanicus*) [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2007, 32(7/8): 383-387.
- [12] WALSBERG G E. Thermal effects of seasonal coat change in three subarctic mammals[J]. *Journal of Thermal Biology*, 1991, 16(5): 291-296.
- [13] HART J S. Seasonal changes in insulation of the fur[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1956, 34(1): 53-57.
- [14] HARRIS G D, HUPPI H D, GESSAMAN J A. The thermal conductance of winter and summer pelage of *Lepus californicus* [J]. *Journal of Thermal Biology*, 1985, 10(2): 79-81.
- [15] 东北林业大学. 动物毛皮传热系数测试装置: 201120252203.1 [P/OL]. 2012-03-07 [2024-05-08]. <http://epub.cnipa.gov.cn/Dxb/IndexQuery>. Northeast Forestry University. Animal fur heat transfer coefficient test equipment: 201120252203.1 [P/OL]. 2012-03-07 [2024-05-08]. <http://epub.cnipa.gov.cn/Dxb/IndexQuery>.
- [16] 郑雷, 张伟, 张斌, 等. 动物体被稳态过程热物性参数测试平台的构建[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(2): 117-119.
ZHENG L, ZHANG W, ZHANG B, *et al.* Construction on test-board of thermophysical parameters for animal integument during steady process [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(2): 117-119.
- [17] 郑雷. 体被热物性参数测试平台构建及测试应用研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
ZHENG L. Research on the construction and application of testing platform for the physical property parameters of bulk coating [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [18] 郑雷, 张伟, 华彦. 哺乳动物毛被传热性能及其影响因素[J]. *生态学报*, 2011, 31(13): 3856-3862.
ZHENG L, ZHANG W, HUA Y. Heat transfer property of mammal pelage and its influencing factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(13): 3856-3862.
- [19] 张溯源, 张伟, 郑雷. 不同生境黄鼬毛皮保温性能比较及传热测试实验优化[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(4): 68-70; 119.
ZHANG S Y, ZHANG W, ZHENG L. Comparison of thermal insulation performance of pelage in Siberian weasel from different habitats and experimental optimization of heat transfer measurement [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(4): 68-70; 119.
- [20] 陶文铨. 传热学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
TAO W Q. *Heat transfer*[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [21] CUI L Y, LIU W, XU Y C, *et al.* A new method to estimate hair density of small mammal pelage [J]. *Journal of Mammalogy*, 2020, 101(4): 1205-1212.
- [22] 张艳梅. 蒙古羊对寒冷环境的生理适应性机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
ZHANG Y M. Study on the physiological adaptability mechanisms of Mongolian sheep to cold environment [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [23] 张麟, 王睿, 杨芳, 等. 中缅甸树鼩肝在冷适应条件下的产热特征[J]. *动物学杂志*, 2009, 44(4): 47-57.
ZHANG L, WANG R, YANG F, *et al.* Thermogenesis characteristics of cold adaptation of liver in *Tupaia belangeri* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2009, 44(4): 47-57.
- [24] ROMU T, VAVRUCH C, DAHLQVIST-LEINHARD O, *et al.* A randomized trial of cold-exposure on energy expenditure and supraclavicular brown adipose tissue volume in humans [J]. *Metabolism*, 2016, 65(6): 926-934.
- [25] SPONTON C H, DE LIMA-JUNIOR J C, LEIRIA L O. What puts the heat on thermogenic fat: metabolism of fuel substrates [J]. *Trends in Endocrinology & Metabolism*, 2022, 33(8): 587-599.
- [26] 张淑红, 付冬丽, 陈栋, 等. 动物脂肪细胞形成的动力学机制及应用研究进展[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2012(11): 31-33.
ZHANG S H, FU D L, CHEN D, *et al.* Research progress on dynamic mechanism and application of animal adipocyte formation [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2012(11): 31-33.