

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 13 期 Vol.31 No.13 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 13 期 2011 年 7 月 (半月刊)

目 次

我国东部北亚热带植物群落季相的时空变化	陈效速, 亓孝然, 阿 杉, 等 (3559)
华北低丘山地人工林蒸散的季节变化及环境影响要素	黄 辉, 孟 平, 张劲松, 等 (3569)
东北东部 14 个温带树种树干呼吸的种内种间变异	许 飞, 王传宽, 王兴昌 (3581)
RS 和 GIS 支持的洪河地区湿地生态健康评价	王一涵, 周德民, 孙永华 (3590)
应用光合色素研究广西钦州湾丰水期浮游植物群落结构	蓝文陆, 王晓辉, 黎明民 (3601)
基于不可替代性的青海省三江源地区保护区功能区划研究	曲 艺, 王秀磊, 栾晓峰, 等 (3609)
融雪时间对大卫马先蒿生长和繁殖特性的影响	陈文年, 吴 彦, 吴 宁, 等 (3621)
巴郎山刺叶高山栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 对海拔高度的响应	冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等 (3629)
宁南半干旱与半干旱偏旱区苜蓿草地土壤水分与养分特征	任晶晶, 李 军, 王学春, 等 (3638)
南岭小坑藜蒴栲栎群落地上部分生物量分配规律	李 根, 周光益, 王 旭, 等 (3650)
放牧对五台山高山、亚高山草甸牧草品质的影响	章异平, 江 源, 刘全儒, 等 (3659)
短期增温对贡嘎山峨眉冷杉幼苗生长及其 CNP 化学计量学特征的影响	 羊留冬, 杨 燕, 王根绪, 等 (3668)
锰胁迫对垂序商陆叶片形态结构及叶绿体超微结构的影响	梁文斌, 薛生国, 沈吉红, 等 (3677)
土荆芥挥发油对蚕豆根尖细胞的化感潜力	胡琬君, 马丹炜, 王亚男, 等 (3684)
喀斯特城市杨树人工林微量元素的生物循环	王新凯, 田大伦, 闫文德, 等 (3691)
大兴安岭林区多孔菌的区系组成与种群结构	崔宝凯, 余长军 (3700)
铜绿微囊藻和斜生栅藻非稳态营养盐限制条件下的生长竞争特性	赵晓东, 潘 江, 李金页, 等 (3710)
陆地棉萌发至三叶期不同生育阶段耐盐特性	王俊娟, 王德龙, 樊伟莉, 等 (3720)
基于模式生物秀丽隐杆线虫的三丁基锡生态毒性评价	王 云, 杨亚楠, 简风雷, 等 (3728)
大庆油田石油开采对土壤线虫群落的影响	肖能文, 谢德燕, 王学霞, 等 (3736)
若尔盖高寒草甸退化对中小型土壤动物群落的影响	吴鹏飞, 杨大星 (3745)
洞庭湖湿地土壤环境及其对退田还湖方式的响应	刘 娜, 王克林, 谢永宏, 等 (3758)
渭北旱塬苹果园地产量和深层土壤水分效应模拟	张社红, 李 军, 王学春, 等 (3767)
黄土丘陵区不同土地利用下土壤释放 N_2O 潜力的影响因素	祁金花, 黄懿梅, 张 宏, 等 (3778)
东北中部地区水稻不同生育时期低温处理下生理变化及耐冷性比较	宋广树, 孙忠富, 孙 蕾, 等 (3788)
硫对成熟期烤烟叶绿素荧光参数的影响	朱英华, 屠乃美, 肖汉乾, 等 (3796)
高温强光对温州蜜柑叶绿素荧光、D1 蛋白和 Deg1 蛋白酶的影响及 SA 效应	 邱翠花, 计玮玮, 郭延平 (3802)
覆膜对土壤-莴苣体系氮素分布和植物吸收的影响	李丽丽, 李非里, 刘秋亚, 等 (3811)
基于空间分带的崇明东滩水鸟适宜生境的时空动态分析	范学忠, 张利权, 袁 琳, 等 (3820)
驯鹿对苔藓植物的选择食用及其生境的物种多样性	冯 超, 白学良 (3830)
北京城市绿地调蓄雨水径流功能及其价值评估	张 彪, 谢高地, 薛 康, 等 (3839)
专论与综述	
冻土甲烷循环微生物群落及其对全球变化的响应	倪永清, 史学伟, 郑晓吉, 等 (3846)
哺乳动物毛被传热性能及其影响因素	郑 雷, 张 伟, 华 彦 (3856)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-07



封面图说: 滇金丝猴是我国特有的世界珍稀动物之一, 属国家一级重点保护物种。仅生活在滇藏交界处的高寒云冷杉林中, 是我国川、滇、黔三种金丝猴中唯一具有和人类一样美丽红唇的金丝猴。手中的松萝是它最喜爱的食物之一。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

郑雷, 张伟, 华彦. 哺乳动物毛被传热性能及其影响因素. 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. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(13): 3856-3862.

哺乳动物毛被传热性能及其影响因素

郑 雷, 张 伟*, 华 彦

(东北林业大学 野生动物资源学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 毛被能够加强或减弱动物向周围环境的热量散失, 毛被的形态结构和颜色是传热性能的决定因素, 其传热过程往往是传导、对流和辐射 3 个过程的耦合。以往研究发现环境因子中, 风可增加机体向环境中的散热速率, 且散失量与风速正相关, 动物通过调节在风场中的姿态来适应不同风向。动物体与环境间的温差是影响散热速率的另一因素, 不同环境中的动物通过改变毛被结构来适应温差变化。毛被含水率上升会引起导热和蒸发冷却作用加强, 动物通过行为或毛被结构变化来调节毛被含水率。毛色决定毛被吸收和反射热辐射的能力。毛被传热性能直接把动物的生理特点与环境因子关联起来, 这对揭示动物的适应、进化机制都具有重要意义。同时提出, 毛被结构和传热性能的研究还有助于仿生学意义的挖掘。因此, 今后应重点在毛被结构和物理性能、研究技术与方法以及毛被生物学和仿生学意义等方面开展研究。

关键词: 哺乳动物; 毛被; 传热性能; 影响因素

Heat transfer property of mammal pelage and its influencing factors

ZHENG Lei, ZHANG Wei*, HUA Yan

College of Wildlife Resources, Northeast Forest University, Harbin 150040, China

Abstract: Animals living in thermally stressful environments exhibit morphological, physiological and behavioral adjustments to regulate the thermal balance. The insulation of pelage can retard or enhance heat loss. Pelage structure and color are factors that contribute to regulation of heat transfer. We review the heat transfer properties of mammalian pelage and the factors that influence rates of transfer. Heat transfer through pelage occurs as a result of thermal transduction, convection and radiation. Each of these processes is affected by wind, temperature, moisture and solar radiation. Wind has a strong influence on convection. When hair is separated or compressed by wind, the thermal insulation of pelage is lower than in still air. Wind speed is positively correlated with the amount of heat loss. At high wind speeds, the relationship between hydrodynamic parameters and heat loss cannot be accurately defined. However, thermal conductance can be estimated from cooling curves in still air adjusted for different wind speeds. Body orientation relative to wind direction also affects the heat loss rate due to the direction of hair growth; animals facing toward the wind have lower insulation than back to the wind. The differential between an animal's body temperature and the surrounding air temperature is another influencing factor, heat loss increases with increasing differentials. Animals show higher sensitivity to temperature change when hair is lacking. Animals adapt to environmental temperatures through evolutionary changes in their pelage structure that avoid the need for increased energy expenditure. In cold environments well-insulated mammals have more latitude in habitat selection and behavior than do poorly insulated mammals. Moisture also affects thermal conduction of pelage. Increasing pelage humidity increase the heat loss by thermal conductive and evaporative cooling. Because water has a thermal coefficient 23.1 times higher than air, wet pelage loses heat about 3 times faster than dry pelage. Apart from this, the distribution pattern, quantity, and secretion capacity of sweat glands are additional factors influencing pelage insulation.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30970347); 黑龙江省科技计划重点项目(GB06B205-1)

收稿日期: 2010-12-04; **修订日期:** 2011-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zwfur@yahoo.com.cn

Animals optimize their pelage humidity through behavioral regulation and pelage structure. Solar radiation can compensate animal body heat loss. Pelage color determines the capacity for absorbance and reflection of radiant heat, with darker pelage absorbing more solar heat but with lower penetrability than lighter pelage. Solar heat gain is a potentially important factor in the energy budget of diurnal mammals. This may be significant for mammals feeding on poor quality food with low energy density and variable availability. In conclusion, heat transfer capability directly links animal physiology with environmental factors, which is important for understanding the mechanisms of adaptation and evolution. Variations in heat transfer of pelage suggest that knowledge of pelage structure and physiological properties may also facilitate bionic exploration. We recommend continued research concentration on the structure and physiology of pelage and development of supporting technology, especially on bionic significance and applications.

Key Words: mammal; pelage; heat transfer property; influence factor

哺乳动物作为内温动物需要维持产热和散热平衡。毛被是哺乳动物特有体表覆盖物^[1],具有多变的传热性能,是维持产热-散热平衡的重要结构之一^[2],可改善动物抗寒、抗热、抗风、抗湿、抗辐射等诸多特性^[3-4]。因此,毛被的出现是一个重要历史事件,直接促进了动物对复杂环境的适应能力,推动了扩散和物种分化^[5-7]。同时,毛被也成为生理学(功能)-形态学(结构)-生态学(进化与适应)研究的重要内容。毛被功能形态学的研究主要依赖于各种生物测试技术的进步和工程热物理学的横向发展。从20世纪至今,这些技术的发展,使人们对毛被传热特性、传热机制的认识从定性过渡到定量。然而,从文献的数量和年代看,有关研究似乎并没有被纳入上述学科的主流中,未能引起相关学者足够的关注。有鉴于此,本文从毛被传热特性出发,围绕环境因子对毛被传热性能的影响做一综述,以期引起相关学者关注。

1 毛被传热特性及其测定方法和装置发展

1.1 毛被传热特性和传热过程

毛被由皮肤上着生的纤维状被毛构成,被毛的形态结构有所分化,分为绒毛和针毛两大基本类型^[1]。绒毛柔细而密度大,其间可形成大量的滞留空气而形成隔热层;针毛粗硬而相对较少,对维持毛被稳定结构起到支撑作用^[1,8]。毛被传热性能是指,在以毛被为介质的热量传递中,毛被对热量传递能力的强弱^[3,7],单位时间内通过毛被的热量传递速率越大,毛被隔热性能越差。

热量传递方式可分为3种:导热、对流和热辐射^[9]。毛被并非各项同性介质,其传热过程为以上传热方式的耦合^[10-12]。热量经过毛被的整个过程可分为4个环节:第一,从高温血液到皮肤内壁的对流换热;第二,经过皮肤内壁(高温侧)到皮肤外壁(低温侧)的导热;第三,由皮肤外壁到毛被表面的导热;第四,毛被表面与周围环境间的对流换热和辐射换热^[7]。由此可见,要分析这些传热过程需要对温度的测量有较高的精确性和灵敏性,方法不易受外界因素影响且测试装置具有稳定性。

1.2 毛被传热性能测定方法和装置

由于毛被的结构特异,双平板法和瞬态法^[9]已不能对其传热性能进行有效测定,单平板法和稳态法^[9]目前被广泛采用。20世纪50年代开始,一些学者开始利用自制实验装置测定毛被传热系数、导热系数、热扩散系数、热阻等热物性参数。典型的是Scholander等将待测毛被固定于两夹框间,将二者加热至37℃后置于0℃水浴(测定水生动物)和0℃空气(测定陆生动物)中,通过计算导热系数对南极18种哺乳动物毛被的传热性能进行比较^[13]。随后,这一方法又被Kvadsheim等应用于格陵兰海豹(*Phoca groenlandica* Erxleben)毛被和缟鲸(*Balaenoptera acutorostrata* Lacepede)脂肪传热性能研究中^[14]。另外,Gerrish利用不同温度的保温隔室,通过毛被的热扩散系数研究了褐家鼠(*Rattus norvegicus*)对环境温度变化的响应^[15]。之后,Jofré将壮暮鼠(*Calomys musculus*)毛被缝制包裹在中央带有温度计的铝筒外,加热至37℃后置于相同低温环境中,通过散热系数比较不同季节毛被传热性能差异^[16],此方法优点在于直观易行。之后,Justin和George以水循环向金

属恒温板提供热量来模拟动物体温,在恒温板上分别覆盖相同规格的热流计和毛被试样,通过计量通过不同毛被的热流密度和两侧温差计算传热系数,对拉布拉多白足鼠(*Peromyscus maniculatus*)和草原田鼠(*Microtus pennsylvanicus*)腹部毛被的传热性能进行不同风速、温度、季节条件下的比较研究^[17],成功证实了人工模拟环境因子和毛被传热性能种间比较研究的可行性。Robyn 等考虑到不同毛色对光辐射热吸收率存在差异,在前人的设计中添加了辐射控制部分,使光透过特定面积圆孔的铝箔纸照射到毛被上,记录 3 种毛被颜色跳羚(*Antidorcas marsupialis*)的辐射热获得情况,并结合 3 种毛被颜色跳羚的行为,讨论了毛色与动物行为的关系^[18]。

2 环境因子对毛被传热性能的影响

毛被在宏观和微观上的性状差异是适应环境的结果,这些差异在自然环境中受诸多生态因子影响,而这些影响因子主要包括风、温度、湿度、太阳辐射等^[19]。若这些因子在较大尺度的空间上具有持续性的特征,就会成为动物适应进化的选择性因子,针对这些因子的研究就具有进化生态学意义。

2.1 风

空气流动的不同强度及特征形成不同类型的风,这是陆生动物生存环境的常见因子。无疑,低温条件下的风可能成为动物生存的胁迫因子。目前,风速、风向、动物在风场中的姿态对毛被传热性能的影响是此方面的研究热点,这些影响因素与动物行为及其在自然界中的时间和空间分布格局都有密切联系。

风速的影响主要表现为对毛被隔热层稳定性的破坏,如绒毛层被吹散以及针毛层倒伏等,且热量散失量随风速增加而上升^[8]。在气体流量为 0—0.91STP/min 范围内,褐小家鼠(*Mus cervicoior Hodgson*)毛被传热性能很稳定,这表明此范围适于测定传热系数最小值^[20]。此外,风速对毛被传热的影响还与风温有关,温差越大热交换速率越大^[21]。然而,毛被的各项流体力学参数也是对流换热研究中需要考虑的,但在风速小于 4 m/s 的强迫对流条件下,毛被表面的努赛尔特系数、雷诺系数与表面温度和热通量之间的相互关系并不唯一^[22]。因此,限于毛被材料的特殊性和复杂性,尚未建立精确分析毛被的对流换热模型。

除此之外,哺乳动物的被毛方向通常是由体前指向体后^[1]。这一现象使毛被传热性能在低风条件下表现为,毛被迎风热阻高于背风热阻^[8]。因此,动物在自然条件下会不断调整姿态来适应不同风向,防止过多的热量散失。但在相同风速条件下,毛被表面散热面积越小越蓬松,则风向产生的影响越小^[23-24]。此外,在拉布拉多白足鼠与草原田鼠腹部冬季毛被的测试中,风速和风向对拉布拉多白足鼠的影响要高于草原田鼠,但夏季却相反^[17]。这个结果会使人自然联想到生态位差异对毛被进化的影响。

2.2 温度

理论上讲,对特定结构的毛被,温度主要通过温差变化对毛被散热量产生不同影响,它在进化生态学上是塑造动物毛被特征的重要因子,也是影响动物生存活动最广泛因子^[3],这为研究不同季节、不同温度环境对动物的影响提供理论依据。研究证实,毛被单位时间、单位面积上的热量传递速率与温差成正比^[25-26],这表明傅里叶第二定律同样适于分析发生于动物毛被上的热量传递。反过来,作为一种适应对策,动物会通过调整毛被传热性能来克服不同温差产生的不利影响^[27-28],例如,褐家鼠在寒冷环境刺激下,通过增加毛长度、毛密度等途径增强毛被热阻来抵抗低温^[15];壮暮鼠在相同温差条件下,蓬松状态的毛被冷却系数低于自然状态,且无毛的毛被最高^[29]。所以,季节性换毛动物的毛被在不同季节体现出的传热性能差异^[16,30]表明,毛被空间结构对动物适应温差变化具有重要意义,也是进化压力产生的结果之一。

另外,在缺乏毛被或毛被不发达的哺乳动物中,动物通过生理、行为的调节来适应温差变化。Šumbera 发现由于缺乏毛被,2 种穴居鼯鼠耗氧量随温度下降而显著上升,这表明毛被的缺失使其对周围温度的变化更为敏感。他还指出,2 种不同生活方式的鼯鼠(群居和独居)使其适应环境的策略相异^[26]。另外,一部分具有毛被但不发达的哺乳动物,在抵抗低温时也通过增加皮下脂肪的策略适应寒冷环境^[31]。

2.3 湿度

无论是陆生、水生还是半水生哺乳动物都面临湿度因子的影响。动物如何调整毛被结构并达到与环境湿

度因子相适应是动物生态研究的焦点之一。毛被主要依赖毛被层中容纳的静止空气层实现隔热,滞留空气体积和稳定程度越大,毛被保温性能越强^[1]。因此湿度产生影响主要体现在两个方面,一方面,湿度上升必然导致毛被含水率增大,而水的导热系数是空气的 23.1 倍^[9],这对毛被隔热性能产生消极影响^[32]。另一方面,水的浸入改变了毛与毛间的空间关系,如打绺、倒伏等,这些变化影响了滞留空气的体积和稳定性^[33]。

上述研究提示,不同环境湿度对动物毛被的进化形成驱动力。如水栖哺乳类向水环境散热速率很快,必须通过增加静止空气层的稳定性,以此提高毛被产生的浮力和隔热性能,增加毛密度和毛长度都是重要的解决对策^[34]。但是,如果毛被过厚又会在游泳时产生更大的水阻,所以,水獭、河狸、海豹等毛被具有密而短的特征。此外,初生幼体的体温调节能力较差,而湿润毛被的散热速率会比干燥时高约 3 倍^[35],并且在 3—20 ℃ 范围内,湿毛被较干毛被热阻随温度上升而下降的趋势更为明显,动物的低温临界温度也升高,这表明湿度因子在温度的协同作用下对毛被传热性能的影响更显著^[36]。这些结果提示,在自然界中出生幼体的毛被必须尽快干燥,这使母性成为一种选择压力,同时,幼仔出生季节也是一种选择压力。

除了外界环境会改变毛被含水率,动物分泌汗液也是改变毛被含水率的因素之一。汗液的蒸发冷却同样增加机体向环境中的热量散失^[37-38],而这部分散热量与汗腺数量和分泌汗液量呈正相关,且在高温条件下尤为显著^[39-42]。这使汗腺的分布格局、数量、分泌能力等因物种处于不同的生态位而发生分化,成为另一种进化压力。

2.4 辐射

目前,热辐射对毛被传热性能产生影响的机理仍不完全清楚,大多数学者围绕动物毛被对热辐射的吸收和反射两方面进行探索,其中毛被颜色与热辐射之间的关系是研究热点,其研究成果也通常作为解释动物行为与分布的佐证。

动物直接吸收和释放的辐射热都属于辐射能^[18,43]。由于缺乏毛被表面辐射特性的资料,以往研究多将其假定为黑体或灰体^[7]。动物毛被对太阳辐射的响应主要表现在吸收率、反射率和透过率的变化上。毛色和毛鳞片类型等对毛被获得太阳辐射热的能力产生影响^[44-45]。自然界中大多数动物夏季毛色深于冬季,这主要是适应不同季节环境色调的结果。Glenn 等人从毛被传热角度出发对这一现象的解释是,冬季毛被的光学特性在有效阻碍毛被高反射率的同时,使热效应在冬季毛被中穿透更深^[46-47],从而表现为深色毛被较白色毛被更容易获得辐射热量,而白色毛被较黑色毛被较易被辐射穿透^[48]。如赛加羚羊(*Saiga tatarica*)毛被深色的上中段能够强化吸收太阳的热辐射能,而灰色的下端则可减少体表辐射热量的损失^[49],但这些研究缺乏量化数据的支持。

高风速和低温的协同作用使动物的代谢率显著增加,且在夏季的影响较冬季显著^[50]。毛被抗辐射能力也与风速相关,风速越大毛被的抗辐射能力越弱^[51],如格陵兰海豹毛被层温度受风和太阳辐射协同作用的影响显著^[52]。此外,相关学者对鸟类羽被的保温性能也进行了类似的研究^[53-61],这些研究提示自然条件下上述环境因子对动物体被传热性能普遍产生影响。

3 毛被与哺乳动物的生态适应和进化

哺乳动物毛发产生的根本原因目前尚没有定论^[62],但是毛被的存在显著提高了哺乳动物适应复杂环境的能力,这一能力的获得引发了哺乳动物进化中的一系列连锁反应。首先毛被的隔热效应使动物体热散失速率变低,作为代谢水平很高(相对于外温动物而言)的内温动物,剧烈运动时的产热率很高,为了尽快散失热量,引发了动物行为方面的两种对策,一是主动寻找低温环境,如洞穴、阴凉处等,二是迁徙到环境温度较低的地区。另一方面,动物在寒冷环境中,也会主动趋避寒冷侵袭,如北方动物冬季巢穴温度远高于夏季平均温度。因此,毛被的出现引发了动物进化上的新问题和新策略。

综上所述,风、温度、湿度、辐射等环境因子在作用于动物体时具有时间、空间上的差异。比如晴朗的天气或高原地区,辐射是白天的重要因素,但对于夜行性动物,辐射就成为次要因素。再如,动物可以通过行为躲避强风、降水、高温、低温等不利因子的作用。所以,这些环境因子所形成的选择压力因物种、时间、空间、环境

等特征而变化,并且动物体的适应方式也与其综合作用有关。毛被因其特殊的传热性能将动物的生理与环境因子直接关联起来,其本身的进化与动物的适应、扩散、分化等过程也密切关联。近年来关于毛色、毛发生理的分子生物学研究为进一步揭示这些科学问题起到推动作用。但是,从整体上看,重视程度还不够。

4 研究展望

毛被是哺乳动物生理和环境因子之间的关键联系之一,它对保温与散热的协调作用是哺乳动物类群获得广泛辐射适应的生存对策之一。今后的研究应从以下三方面入手,以便深入揭示毛被自身进化和对动物适应与进化的意义:

(1) 毛被的结构与物理性能

结构是功能变化的基础,因此首先应重点研究毛被的形态结构、功能的变化规律以及二者之间的联系。绒毛、针毛的分化、配比、密度、厚度、组织形式、空间格局等是毛被结构变化的基本条件,所以,应对毛的分化趋势、每类毛的形态结构特点等进行深入研究,然后再研究不同组织方式下形成毛被的结构特点,为揭示毛被的物理性能提供结构基础,国际上此方面已取得初步成果^[15,30,63-64]。毛被的物理性能是指与其结构和功能相关的物理特性,主要包括结构稳定性、热量传递能力、光吸收和反射、吸水性、浸润性、机械缓冲性、抗摩擦性、自洁性等。上述物理性能均与动物的行为、生理、适应相关,直接和特定的环境因子相联系。这些性能的改变需要多种生理和进化对策,是基因组系统性改变的综合效应。

(2) 研究技术和方法的创新

毛被的研究必须借助多学科的理论、技术和工具。在本文阐述的研究方法中可以看出,传统热力学理论和装置经过改进在毛被传热性能研究中同样有效。然而,以往的研究样本多是离体毛被,活体无创测试和空间温度场无损测取是需要攻克的难题,结合红外测温数据进行生物体的三围温度场无损重构可能是最有前景的解决途径。并且在其它领域应用的技术完全可以借鉴过来,将宏观与微观、定性和定量结合,获得更全面的研究结果。另外,在不同性别、年龄、身体部位等方面,以毛被传热性能为基础的研究相对较少,这可能成为讨论毛被在动物适应进化中发挥作用的一条新研究途径。

(3) 毛被仿生学意义的挖掘

毛被的研究不仅对揭示动物的适应、进化等具有重要意义,而且从毛被传热性能出发得出的一些规律,对于工程技术的进步也具有重要参考意义。比如毛被的热传递特征、机制和规律可能对研发可控隔热材料具有参考价值,尤其是通过智能控制使其结构或性质发生改变,进而改变材料传热性能,如高温设备的强化散热、供暖设备散热效率的提升以及围护结构的强化保温。这对当今节能减排低碳时代新技术的研发具有尤其突出的指导意义。再如,毛被颜色是影响动物吸收辐射热的重要因素,而毛被从里向外颜色的变化对于吸收辐射热和保存热量有着特殊意义^[49],这对于优化隔热材料的性能也同样具有指导意义。总之,毛被的研究不仅是毛被本身的问题,也不仅限于动物的适应和进化等生物学问题,还具有非常广阔的仿生学意义和应用前景。如果被公众所认识,可能成为推动毛被研究的直接动力。

References:

- [1] Zhang W, Jing S Y, Xu Y C. Fur Science (2nd). Harbin: Northeast Forest University Press, 2000: 1-17, 19-21, 66-81, 103-105.
- [2] Mariana B, de Lamo D A. Thermal conductance of guanaco (*Lama guanicoe*) pelage. Journal of Thermal Biology, 2005, 30(8): 569-573.
- [3] Cain J W, Krausman P R, Rosenstock S S, Turner J C. Mechanisms of thermoregulation and water balance in desert ungulates. Wildlife Society Bulletin, 2006, 34(3): 570-581.
- [4] Zhang W, Xu Y C. A review and prospects of the research on hair microstructure. Acta Theriologica Sinica, 2003, 23(4): 339-345.
- [5] Parker K L, Gillingham M P. Estimates of critical thermal environments for mule deer. Journal of Range Management, 1990, 43(1): 73-81.
- [6] Cheng Z B, Zhang W, Hua Y, Xu Y C. Winter pelage characteristics and implications for insulation of captive arctic fox in Mohe, Heilongjiang, China. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(11): 2972-2980.
- [7] Liu J, Wang C C. Bio-heat Transfer. Beijing: Science Press, 1993: 50-65.
- [8] McArthur A J, Monteith J L. Air movement and heat loss from sheep. I. Boundary layer insulation of a model sheep, with and without fleece. Proceedings of the Royal Society B, Biological Sciences, 1980, 209(1175): 187-208.

- [9] Yang S M. Heat Transfer Theory. Beijing: Higher Education Press, 1987:7-32.
- [10] Incropera F P, Dewitt D P, Bergman T L, Lavine A S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer(4th). New York: John Wiley and Sons, 1966: 73-134.
- [11] Fletcher L S. Recent developments in contact conductance heat transfer. Journal of Heat Transfer, 1988, 110(4b): 1059-1070.
- [12] Irvine T F J. Contact resistance//Schlunder E U, ed. Heat Exchanger Design Handbook. Vol 2: Fluid Mechanics and Heat Transfer. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1983:23-40.
- [13] Scholander P F, Walters V, Hock R, Irving L. Body insulation of some arctic and tropical mammals and birds. Biological Bulletin, 1950, 99(2): 225-236.
- [14] Kvadsheim P H, Folkow L P, Blix A S. A new device for measurement of the thermal conductivity of fur and bulbber. Journal of Thermal Biology, 1994, 19(6):431-435
- [15] Gerrish C J, Onischak C M, Alberts J R. Acute, early thermal experience alters weaning onset in rats. Physiology & Behavior, 1998, 64(4): 463-474.
- [16] Jofré M B, Caviedes-Vidal E. Seasonal changes in heat transfer in the small mammal *Calomys musculus* (Rodentia muridae), The role of the skin. Journal of Thermal Biology, 2003, 28(2): 141-147.
- [17] Justin G B, George S B. Seasonal changes and wind dependence of thermal conductance in dorsal fur from two small mammal species(*Peromyscus leucopus* and *Microtus pennsylvanicus*). Journal of Thermal Biology, 2007, 32(7/8): 383-387.
- [18] Robyn S H, Brenda A D, Linda G F, Andrea F, Graham I H K, Leith C R M, Duncan M, Shane K M. Body temperature, thermoregulatory behavior and pelt characteristics of three colour morphs of springbok (*Antidorcas marsupialis*). Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2009, 152(3): 379-388.
- [19] Chato J C ed. Foundation of Heat Transfer//Xu Y S, Qian R Z, translated. Beijing: Science Press, 1991: 5-30.
- [20] Stewart C A, Owens J, McClure P A. Air flow and convective heat loss from small mammals in laboratory metabolism chambers. Journal of Thermal Biology, 1990, 15(3/4): 313-316.
- [21] Chappell M A, Holsclaw D S. Effects of wind on thermoregulation and energy balance in deer mice (*Peromyscus maniculatus*). Journal of Comparative Physiology B: Biochemical Systemic and Environmental Physiology, 1984, 154(6): 619-625.
- [22] McArthur A J, Monteith J L F R S. Air movement and heat loss from sheep II. Thermal insulation of fleece in wind. Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences, 1980, 209(1175): 209-217.
- [23] Gebremedhin K G. Effect of animal orientation with respect to wind direction on convective heat loss. Agricultural and Forest Meteorology, 1987, 40(2):199-206.
- [24] George S B. Blockage errors in studies of the effect of wind on thermoregulatory responses. Journal of Thermal Biology, 1990, 15(3/4): 207-210.
- [25] Jiang M, Gebremedhin K G, Alright L D. Simulation of skin temperature and sensible and latent heat losses through fur layers. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 48(2): 767-775.
- [26] Šumbera R, Zelova J, Kunc P, Knizkova I, Burda H. Patterns of surface temperatures in two mole-rats (Bathyergidae) with different social systems as revealed by IR-thermography. Physiology & Behavior, 2007, 92(3): 526-532.
- [27] Turnpenny J R, McArthur A J, Clark J A, Wathes C M. Thermal balance of livestock I. A parsimonious model. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 101(1): 15-27.
- [28] Turnpenny J R, Wathes C M, Clark J A, McArthur A J. Thermal balance of livestock 2. Applications of a parsimonious model. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 101(1): 29-52.
- [29] Gerken M. Relationships Between Integumental Characteristics and Thermoregulation in South American Camelids. Cambridge: Published Online by Cambridge University Press, 2009.
- [30] Jacobsen N K. Differences of thermal properties of white-tailed deer pelage between seasons and body regions. Journal of Thermal Biology, 1980, 5(3): 151-158.
- [31] Karin M. Thermal insulation of peripheral tissue and coat in sport horses. Journal of Thermal Biology, 1997, 22(3): 169-175.
- [32] Gebremedhin K G, Wu B X. Simulation of sensible and latent heat losses from wet-skin surface and fur layer. Journal of Thermal Biology, 2002, 27(4): 291-197.
- [33] Webb D R, King J R. Effects of wetting of insulation of bird and mammal coats. Journal of Thermal Biology, 1984, 9(3): 189-191.
- [34] Fish F E, Smelstoy J, Baudinette R V, Reynolds P S. Fur does not fly, it floats; buoyancy of pelage in semi-aquatic mammals. Aquatic Mammals, 2002, 28(2):103-112.
- [35] McArthur A J, Ousey J C. The effect of moisture on the thermal insulation provided by the coat of a Thoroughbred foal. Journal of Thermal Biology, 1996, 21(1): 43-48.
- [36] McArthur A J, Ousey J C. Heat loss from a wet animal: Changes with time in the heat balance of a physical model representing a new born homeotherm. Journal of Thermal Biology, 1994, 19(2): 81-89.
- [37] Joshi B C, McDowell R E, Sadhu D P. Body surface evaporation rates at low and high temperatures in Murrah buffalo. Journal of Dairy Science, 1968, 51(10): 1689-1692.
- [38] Das S K, Upadhyay R C, Madan M L. Heat stress in Murrah buffalo calves. Livestock Production Science, 1999, 61(1): 71-78.

- [39] Mullick D N. Review of the investigations on the physiology of Indian buffaloes. *Indian Journal of Dairy Science*, 1964, 17: 45-50.
- [40] Rife D C. The Water Buffalo of India and Pakistan. Washington D. C: International Cooperation Administration, 1959.
- [41] Hafez E S E, Baderldin A L, Shafei M M. Skin structure of Egyptian buffaloes and cattle with particular reference to sweat glands. *Journal of Agricultural Science*, 1955, 46(1): 19-30.
- [42] de Lamo DA, Lacolla D, Heath J E. Sweating in the guanaco (*Lama guanicoe*). *Journal of Thermal Biology*, 2001, 26(2): 77-83.
- [43] Sun R Y. Principles of Animal Ecology(3rd). Beijing: Beijing Normal University Press, 2001:21-40.
- [44] Cooper C E, Walsberg G E, Withers P C. Biophysical properties of the pelt of a diurnal marsupial, the numbat (*Myrmecobius fasciatus*), and its role in thermoregulation. *The Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(16): 2771-2777.
- [45] Walsberg G E, Campbell G S, King J R. Animal coat color and radiative heat gain: a re-evaluation. *Journal of Comparative Physiology B: Biochemical Systemic and Environmental Physiology*, 1978, 126(3): 211-222.
- [46] Walsberg G E. Thermal effects of seasonal coat change in three subarctic mammals. *Journal of Thermal Biology*, 1991, 16(5): 291-296.
- [47] Glenn E W, Catherine A S. Seasonal adjustment of solar heat gain in a desert mammal by altering coat properties independently of surface coloration. *Journal of Experimental Biology*, 1989, 142: 387-400.
- [48] Gebremedhin K G, Ni H, Hillman P E. Modeling temperature profile and heat flux through irradiated fur layer. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1997, 40(5): 1441-1447.
- [49] Wang X. Characteristics of hair cover of Saiga and its adaptability to environment. *Acta Pratacultural Science*, 1998, 7(1): 54-59.
- [50] Rogowitz G L, Gessaman J A. Influence of air temperature, wind and irradiance on metabolism of white-tailed jackrabbits. *Journal of Thermal Biology*, 1990, 15(2): 125-131.
- [51] Dawson T J, Brown G D. A comparison of the insulative and reflective properties of the fur of desert kangaroos. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 1970, 37(1): 23-38.
- [52] Øritsland N A, Ronald K. Effects of solar radiation and wind chill on skin temperature of the harp seal, *Pagophilus groenlandicus* (Erleben, 1777). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1973, 44(2): 519-525.
- [53] Webster M D, Weathers W W. Effect of wind and air temperature on metabolic rate in Verdens, *Auriparus flaviceps*. *Physiological Zoology*, 1988, 61(6): 543-554.
- [54] Ainley D G, Schlatter R P. Chick raising ability in Adélie penguins. *The Auk*, 1972, 89: 559-566.
- [55] Bakken G S, Williams J B, Ricklefs R E. Metabolic response to wind of downy chicks of Arctic-breeding shorebirds (*Scolopacidae*). *The Journal of Experimental Biology*, 2002, 205(22): 3435-3443.
- [56] Stonehouse B. The general biology and thermal balances of penguins. *Advances in Ecological Research*, 1967, 4: 131-196.
- [57] Stahel C D, Nicol S C, Walker G J. Heat production and thermal resistance in the little penguin *Eudyptula minor* in relation to wind speed. *Physiological Zoology*, 1987, 60(4): 413-423.
- [58] Banta M R, Lynott A J, VanSant M J, Bakken G S. Partitioning heat loss from mallard ducklings swimming on the air-water Interface. *Journal of Experimental Biology*, 2004, 207(26): 4551-4557.
- [59] Stoutjesdijk F. The ugly duckling: a thermal viewpoint. *Journal of Thermal Biology*, 2002, 27(5): 413-422.
- [60] McCafferty D J, Moncrieff J B, Taylor I R. The effect of wind speed and wetting on thermal resistance of the Barn owl (*Tyto alba*). I: Total heat loss, boundary layer and total resistance. *Journal of Thermal Biology*, 1997, 22(4/5): 253-264.
- [61] McCafferty D J, Moncrieff J B, Taylor I R. The effect of wind speed and wetting on thermal resistance of the barn owl (*Tyto alba*). II. Coat resistance. *Journal of Thermal Biology*, 1997, 22(4/5): 265-273.
- [62] Bergmán J. Why mammal body hair is an evolutionary enigma. *Creation Research Society Quarterly*. 2004, 40(3): 240-243.
- [63] Morrison P. Insulative flexibility in the Guanaco. *Journal of Mammalogy*, 1966, 47(1): 18-23.
- [64] Timisjärvi J, Nieminen M, Sippola A L. The structure and insulation properties of the reindeer fur. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1984, 79(4): 601-609.

参考文献:

- [1] 景松岩, 张伟, 徐艳春. 毛皮学(第二版). 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2000: 1-17, 19-21, 66-81, 103-105.
- [4] 张伟, 徐艳春. 毛发微观结构研究的回顾与展望. *兽类学报*, 2003, 23(4): 340-345.
- [6] 程志斌, 张伟, 华彦, 徐艳春. 漠河地区养殖的北极狐冬季被毛性状与保温性能的关系. *生态学报*, 2010, 30(11): 2972-2980.
- [7] 刘静, 王存诚. 生物传热学. 北京: 科学出版社, 1993: 50-65.
- [9] 杨世铭. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1987: 7-32.
- [19] 切托, 生物传热学基础//徐云生, 钱壬章, 译. 北京: 科学出版社, 1991: 5-30.
- [43] 孙儒泳. 动物生态学原理(第三版). 北京: 北京师范大学出版社, 2001: 21-40.
- [49] 汪玺. 赛加羚羊被毛及毛纤维特征对其环境适应性的研究. *草业学报*, 1998, 7(1): 54-59.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 13 July, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Spatiotemporal variation of plant community aspections in the north-subtropical zone of eastern China	CHEN Xiaoqiu, QI Xiaoran, A Shan, et al (3559)
Seasonal variations and environmental control impacts of evapotranspiration in a hilly plantation in the mountain areas of North China	HUANG Hui, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (3569)
Intra- and inter-specific variations in stem respiration for 14 temperate tree species in northeastern China	XU Fei, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (3581)
Assessment of the ecological health of wetlands in Honghe supported by RS and GIS techniques	WANG Yihan, ZHOU Demin, SUN Yonghua (3590)
Phytoplankton community structure in Qinzhou Bay during flood season by analysis of HPLC photosynthetic pigment signatures	LAN Wenlu, WANG Xiaohui, LI Mingmin (3601)
Irreplaceability-based function zoning of nature reserves in the Three Rivers Headwater Region of Qinghai Province	QU Yi, WANG Xiulei, LUAN Xiaofeng, et al (3609)
Effects of snowmelt timing on individual growth and reproduction of <i>Pedicularis davidii</i> var. <i>pentodon</i> on the eastern Tibetan Plateau	CHEN Wennian, WU Yan, WU Ning, et al (3621)
Response of foliar $\delta^{13}\text{C}$ of <i>Quercus spinosa</i> to altitudinal gradients	FENG QiuHong, CHENG Ruimei, SHI Zuomin, et al (3629)
Soil water and nutrient characteristics of alfalfa grasslands at semi-arid and semi-arid prone to drought areas in southern Ningxia	REN Jingjing, LI Jun, WANG Xuechun, et al (3638)
Aboveground biomass of natural <i>Castanopsis fissa</i> community at the Xiaokeng of NanLing Mountain, Southern China	LI Gen, ZHOU Guangyi, WANG Xu, et al (3650)
Impacts of grazing on herbage quality of the alpine and subalpine meadows within Wutai Mountain	ZHANG Yiping, JIANG Yuan, LIU Quanru, et al (3659)
Short-term effects of warming on growth and stoichiometrical characteristics of <i>Abies fabii</i> (Mast.) Craib seedling in Gongga mountain	YANG Liudong, YANG Yan, WANG Genxu, et al (3668)
Manganese stress on morphological structures of leaf and ultrastructures of chloroplast of a manganese hyperaccumulator, <i>Phytolacca americana</i>	LIANG Wenbin, XUE Shengguo, SHEN Jihong, et al (3677)
Allelopathic potential of volatile oil from <i>Chenopodium ambrosioides</i> L. on root tip cells of <i>Vicia faba</i>	HU WanJun, MA Danwei, WANG Yanan, et al (3684)
Contents and cycling of microelements in Karst urban poplar plantations	WANG Xinkai, TIAN Dalun, YAN Wende, et al (3691)
Fungal flora and population structure of polypores in the Great Xingan Mountains	CUI Baokai, YU Changjun (3700)
Growth competition characteristics of <i>Microcystis aeruginosa</i> Kutz and <i>Scenedesmus obliquus</i> (Turp.) Kutz under non-steady-state nutrient limitation	ZHAO Xiaodong, PAN Jiang, LI Jinye, et al (3710)
The characters of salt-tolerance at different growth stages in cotton	WANG Junjuan, WANG Delong, FAN Weili, et al (3720)
Assessment of tributyltin ecotoxicity using a model animal nematode <i>Caenorhabditis elegans</i>	WANG Yun, YANG Yanan, JIAN Fenglei, et al (3728)
Effect of oil exploitation on soil nematode communities in Daqing Oilfield	XIAO Nengwen, XIE Deyan, WANG Xuexia, et al (3736)
Effect of habitat degradation on soil meso- and microfaunal communities in the Zoigê Alpine Meadow, Qinghai-Tibetan Plateau	WU Pengfei, YANG Daxing (3745)
Characteristics of the soil environment of Dongting Lake wetlands and its response to the converting farmland to lake project	LIU Na, WANG Kelin, XIE Yonghong, et al (3758)
Modeling the changes of yield and deep soil water in apple orchards in Weibei rainfed highland	ZHANG Shehong, LI Jun, WANG Xuechun, et al (3767)
Potential soil N_2O emissions and its controlling factors under different land use patterns on hilly-gully loess plateau	QI Jinhua, HUANG Yimei, ZHANG Hong, et al (3778)
Comparison between physiological properties and cold tolerance under low temperature treatment during different growing stages of rice in northeast central region of China	SONG Guangshu, SUN Zhongfu, SUN Lei, et al (3788)
Effect of sulfur on chlorophyll fluorescence of flue-cured tobacco at maturation stage	ZHU Yinghua, TU Naimei, XIAO Hanqian, et al (3796)
Effects of high temperature and strong light on chlorophyll fluorescence, the D1 protein, and Deg1 protease in Satsuma mandarin, and the protective role of salicylic acid	QIU Cuihua, JI Weiwei, GUO Yanping (3802)
Effect of plastic film mulching on the distribution and translocation of nitrogen in soil-lettuce system	LI Lili, LI Feili, LIU Qiuya, et al (3811)
An analysis on spatio-temporal dynamics of suitable habitats for waterbirds based on spatial zonation at Chongming Dongtan, Shanghai	FAN Xuezhong, ZHANG Liquan, YUAN Lin, et al (3820)
The bryophyte consumed by reindeers and species diversity of bryophyte in reindeer habitats	FENG Chao, BAI Xueliang (3830)
Evaluation of rainwater runoff storage by urban green spaces in Beijing	ZHANG Biao, XIE Gaodi, XUE Kang, et al (3839)
Review and Monograph	
Advances in methane-cycling microbial communities of permafrost and their response to global change	NI Yongqing, SHI Xuwei, ZHENG Xiaoji, et al (3846)
Heat transfer property of mammal pelage and its influencing factors	ZHENG Lei, ZHANG Wei, HUA Yan (3856)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 31 卷 第 13 期 (2011 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 13 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元