

# 大熊猫“找对象”最好做“婚检”

■本报记者 李晨

大明星熊猫花花和萌兰都是高颜值熊。然而，大熊猫繁殖后代一直是复杂而颇具风险的事。萌兰和花花将来能不能找到门当户对的另一半，将颜值和可爱遗传给下一代？

日前，浙江大学、东北林业大学、深圳华大生命科学研究院和中国大熊猫保护研究中心组成的联合团队，首次系统深入地大熊猫进行了保护基因组学研究，为主管部门制订野生大熊猫的保护策略与计划、为大熊猫“找对象”提供了科学依据。相关论文发表于美国《国家科学院院刊》。

## 是叔侄，而不是兄弟

很少有人知道，生活在陕西的秦岭大熊猫和四川大熊猫家族并非兄弟关系，而是叔侄关系。

早在 2005 年，论文通讯作者、浙江大学教授方盛国就对大熊猫进行了分类研究，将中国大熊猫分为四川指名亚种和秦岭亚种。2021 年，方盛国与深圳华大生命科学研究院研究员刘欢团队发现，两个熊猫亚种在距今 1.2 万至 1 万年前开始分化。

“也就是说大熊猫的两个亚种家族，已有 1 万余年未曾谋面。”方盛国说，秦岭大熊猫更为古老，但家族成员群体较小；四川大熊猫家族成员群体更大，遗传多样性更为丰富。

大熊猫生活在六大山系——秦岭、岷山、邛崃、大相岭、小相岭、凉山。但是，六大山系的大熊猫并没有随山系被分割成 6 个种群。他们发现，四川大熊猫不同群体生活在不同山系的高山峡谷，千年来没有通婚，形成了不同的遗传支系，分别为岷山种群、凉山种群、邛崃－大相岭－小相岭种群。

这一次，联合团队对大熊猫进行了大规模、高质量的全基因组重测序和群体基因组学研究，构建了迄今为止最精细的大熊猫遗传变异图谱，揭示了大熊猫六大山系野生种群的遗传结构，发现了显著遗传分化的新亚群结构，模拟了人工圈养繁育子代放归野外的遗传风险。

论文第一作者、东北林业大学教授兰天明告诉《中国科学报》，在四川亚种内部，凉山与其他种群之间的隔离分化时间最早，发生在距今 1.10 万至 0.62 万年前；岷山与邛崃－大相岭－小相岭种群之间的隔离分化时间发生在距今 0.60 万至 0.35 万年前。

在整个隔离分化过程中，发生过多次基因交流事件，特别是秦岭个体迁入岷山种



在中国大熊猫保护研究中心，大熊猫悠闲地吃竹子。 李仁贵供图

群，凉山个体迁入邛崃－大相岭－小相岭种群。这些分支种群之间的基因交流没有完全中断，同时又能在独立的地理单元进行独自的隔离进化，丰富了物种的基因多样性。

## 大熊猫依旧“濒危”

物种的基因多样性对物种存活至关重要。简单来说，多样性越丰富，物种越不容易濒临灭绝。

研究人员发现，大熊猫整体的近亲交配（以下简称近交）和遗传多样性丧失问题并不严重，在野生动物领域处于中等水平，远远低于东北虎、华南虎等物种。

“但不同种群的近交程度存在差异，其中秦岭种群的近交和有害遗传突变的积累最为严重，凉山种群次之。”论文通讯作者刘欢说。

方盛国强调，大熊猫秦岭种群和凉山种群亟须重点关注。秦岭大熊猫经历了持续性的种群衰退历史，一方面可能是由于秦岭地区不仅是华夏文化的发祥地，而且近千年来人口密集、战争频繁，严重影响了大熊猫的栖息繁衍。

另一方面，大熊猫的主食——竹子北界南移，加之持续近交，造成基因组不断纯合化，种群遗传多样性日渐降低，强有害突变

造成幼崽夭折，弱有害突变纯合化积累，导致种群环境适合度下降，从而带来持续性的种群衰退。

“第四次全国大熊猫野外种群普查发现，秦岭山系适宜大熊猫生存的栖息地显著少于其他山系，亟须关注秦岭大熊猫的保护工程。”方盛国说。

凉山大熊猫也是一个相对孤立的古老种群，有效种群数量较小，遗传多样性丧失、近交和有害突变的积累仅次于秦岭种群。在上世纪 50 至 90 年代，凉山种群还经历了一个快速减小的特殊时期。

尽管近 20 年来，我国对凉山种群实施了有效的保护措施，但第三次和第四次全国大熊猫普查结果显示，凉山种群的数量增长程度和栖息地人为干扰的减少程度都是最低的。

兰天明告诉《中国科学报》，目前，凉山种群在地理上被隔离成 5 个不相连的小种群，且两个最大的隔离种群离开发源地较近，另外两个小的隔离种群处于孤立状态，很难与邻近的大种群连通产生足够的基因交流。而且，目前凉山大熊猫栖息地尚未规划到大熊猫国家公园建设中，凉山大熊猫的保护工程也面临诸多困境，未来种群的近交风险和灭绝的可能性值得特别关注。

方盛国强调：“应充分认识到秦岭大熊

# 214 台相机拍摄野生动物“公路片”

■本报记者 沈春蕾

高速公路建设在保护区，会不会对野生动物生存造成威胁？野生动物如何避免“路杀”，安全穿行高速公路？

中国科学院新疆生态与地理研究所研究员杨维康团队在高速公路桥下布设 214 台红外相机，连续两年监测了 22 座下穿式野生动物通道。相关研究成果近日发表于《交通运输研究 D 分册：交通运输与环境》。

“我们的研究发现，这些通道可确保野生动物能够安全自由地穿越高速公路。另外，高速公路的建设运营不仅没有对保护区野生动物的生存造成威胁，反而有助于它们的生存繁衍。”杨维康接受《中国科学报》采访时说。

## 建设野生动物通道

野生动物通道类似于公路或者铁路的过街天桥和地下通道，只不过使用者不是行人而是动物。

一直以来，公路、铁路等基础设施在建设和运营过程中，往往会为野生动物尤其是濒危物种的生存构成严重威胁。为减轻道路对野生动物的生存威胁，建设野生动物通道被公认为最有效的措施之一。

“道路建设和运营对野生动物的负面影响有撞死撞伤、改变迁徙或迁移路线、生境破碎化、基因交流受阻等。”杨维康表示，“野生动物通道能够保障野生动物安全穿越道路，从而维持野生动物生境连通和基因交流。

由于动物没有人类那么聪明，可以自己找路马线、过街天桥和地下通道，因此需要引导动物在不知不觉中使



2023 年，S11 高速公路建成后，216 国道上漫步的蒙古野驴。

为缓解高速公路对野生动物的生存威胁，在 S11 高速公路穿越卡山自然保护区的 130 余公里路段内，建设单位设计修建了 22 座下穿式野生动物通道。

这 22 座下穿式野生动物通道能否有效消除高速公路对蒙古野驴和鹅喉羚的迁移阻隔？影响野生有蹄类动物利用野生动物通道的关键因素是什么？为回答这些问题，杨维康团队开展了进一步的研究。

## 214 台相机连续监测两年

“我们在 22 座下穿式野生动物通道下布设了 214 台红外相机，并从 2020 年 10 月到 2022 年 10 月对上述通道开展连续监测。”杨维康告诉《中国科学报》，“由于道路沿线野生动物的数量可能影响其对通道的使用，我们同期还开展了公路两侧蒙古野驴和鹅喉羚空间分布与种群数量调查。”

据了解，该研究获得 43215 张独立有效照片，其中野生动物占 76.93%、人类活动占 23.07%。有 6 种野生哺乳动物使用过通道，分别是蒙古野驴、鹅喉羚、赤狐、蒙古兔、狼和豺狗。其中鹅喉羚和蒙古野驴的独立有效照片数量最多，分别为 23962 张和 4011 张；22 座下穿式野生动物通道均记录到蒙古野驴和鹅喉羚通过。

通过分析红外相机监测记录的蒙古野驴和鹅喉羚实际穿越频率，与样线调查确定的高速公路两侧这两个物种相对丰度间的关系，杨维康团队计算了 22 座下穿式野生动物通道的性能指数。



2023 年，S11 高速公路建成后，216 国道上漫步的蒙古野驴。

杨维康团队还分析了可能影响蒙古野驴和鹅喉羚使用通道的 14 个环境变量对通道性能的影响，并发现对蒙古野驴而言，有 7 座通道的性能指数较高；对鹅喉羚而言，有 13 座通道的性能指数较高。

“冷季和暖季影响野生动物使用通道的关键环境因素可能不同，因此我们把观测数据分成冷暖季，分别进行统计分析。”杨维康解释说，冷季，鹅喉羚的使用频率与捕食者和人类活动频率呈正相关，而与距铁路通道的距离呈负相关；蒙古野驴的通道使用频率随邻近通道距离增加而增加。暖季，鹅喉羚使用频率随着通道开阔度增加而增加；蒙古野驴使用频率随着通道开阔度增加而增加，但随着距水源距离增加而减少。

研究还发现，保持高速公路和铁路的野生动物通道对应贯穿，可以提高野生动物对通道的利用率，减轻平行道路的综合阻隔影响。

“该研究有助于我们建立一套荒漠生境中野生动物通道有效性评估的方法体系，确定哪些通道结构影响通道有效性，以及在哪里建设通道能够确保野生动物对其高效利用。”杨维康说。

## 确保野生动物安全穿行

那么，野生动物是如何找到并使用这些通道的？

杨维康说：“高速公路一般有围栏，野生动物无法翻越围栏，只能沿着围栏前行，直到抵达下穿式野生动物通道。另外，



鹅喉羚穿越高速公路通道。 受访者供图

猫种群和凉山大熊猫种群受到生存威胁的程度仍然是‘濒危级’，亟须学者、管理者、政府和国际组织予以特别关注，万万不可将所有的大熊猫野生种群视为一个整体降级对待。”

## 不宜随意婚配

研究人员对中国大熊猫保护研究中心和秦岭大熊猫研究中心的 7 个主要繁育谱系的圈养大熊猫样本进行了分析研究，发现圈养大熊猫后代出现有害突变的风险比野生大熊猫更低。

“这表明，科学的圈养谱系管理措施可以有效减少近交，保护圈养个体良好的遗传进化潜力。”论文共同第一作者、中国大熊猫保护研究中心高级工程师李仁贵说，圈养大熊猫“婚配”的时候，应当考虑其祖先属于哪个山系，不同山系的大熊猫之间通婚要做大量婚前遗传检测，不宜随意“婚配”。

此外，圈养大熊猫繁育后代的野化放归，是大熊猫保护工程的遗传拯救策略之一。论文共同第一作者、浙江大学博士杨尚辰指出，遗传拯救工程中有一个令人担忧的问题，因为放归个体可能携带受体种群没有的有害突变，并在受体种群中扩散，将会导致受体种群的有害突变进一步增加。尤其是长期分化的种群之间再次恢复基因流，很可能会因为引入不能适应当下环境的基因，加速小种群灭绝。

刘欢强调，经过模拟评估，他们认为，放归本山系圈养繁育的后代个体，是小种群遗传拯救的最优先策略。因为这既可以避免大熊猫不能很好适应其他山系环境而带来的风险，也能最大限度减少后代个体的有害突变。

因此，对于秦岭、凉山和岷山山系北部的小种群，野化放归的个体应该尽可能选择有各自山系背景的圈养繁育后代，或野外救助的大熊猫；对于大相岭和小相岭这两个山系，由于其与邛崃山系同为一个遗传大分支，所以可以从邛崃山系圈养大熊猫的繁育个体中，挑选遗传背景相似的个体进行放归。

兰天明强调，在野化培训前，应对放归个体未来繁育后代进行遗传模拟预测；放归后对后代进行基因组和表型各项指标的监测。这样可为野化放归提供最具价值的科学数据，并通过不断修正完善放归计划，构建大熊猫野化放归的完整体系。

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1073/pnas.2406343121>

## 发现·进展

中国科学院理化技术研究所等

# 1 升 5 元！大尺寸碳化硅气凝胶实现闪速合成

本报讯(记者倪思洁)中国科学院理化技术研究所研究员李江涛团队与清华大学教授董岩皓课题组合作，利用硅粉－聚四氟乙烯反应剂之间的快速燃烧合成反应，实现了大尺寸碳化硅气凝胶的闪速合成，有望为碳化硅气凝胶的规模化生产和广泛工程应用开辟一条新途径。相关研究成果近日发表于《自然－通讯》。

碳化硅气凝胶是一种轻量化材料。现有工艺虽然能够制备出具有循环压缩性、高拉伸性等优异性能的碳化硅纳米线气凝胶，却普遍存在工艺复杂、生产周期长和制造成本高等问题。如何快速、低成本、低能耗制备大尺寸碳化硅气凝胶，是领域内面临的瓶颈问题。

李江涛介绍，在实验室条件下，采用研究团队研发的新工艺，每分钟可以制备出 16 升碳化硅气凝胶，比现有气凝胶合成技术的生产速度提升了 10 倍。与此同时，该工艺的制备成本降低了两个数量级，制备 1 升碳化硅气凝胶成本仅需 5 元。此外，该工艺的合成过程还具有近零能耗的突出特征，非常适合大尺寸碳化硅气凝胶的低碳、低成本制备。

研究团队通过优选作为碳源的聚四氟乙烯反应剂粉末，利用其作为反应促进剂和气化剂的双重作用，不仅实现了硅／碳弱放热反应体系的燃烧合成，而且实现了对产物微纳尺度微结构的调控。利用这种燃烧合成策略制备的碳化硅气凝胶展现出均匀的内部结构，并具有超轻量化和自支撑的显著特性。

所得碳化硅气凝胶是由许多碳化硅纳米线相互交织和堆叠而成的层状结构材料，该结构使其在 40%应变条件下具有良好的抗疲劳性能，能够承受高达 100 次的循环加载而不发生破坏。碳化硅气凝胶的层状结构特征，结合高达 99.6%的孔隙率以及全陶瓷组分，为其带来了一系列卓越的宏观物理性能。

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-51278-w>

中国科学院华南植物园

# 揭示亚热带河口红树林土壤有机碳来源

本报讯(记者朱汉斌)中国科学院华南植物园生态中心海岸带生态系统过程与健康研究组，通过对广东珠海淇澳红树林自然保护区开展的野外实验研究，揭示了亚热带河口红树林土壤有机碳来源。相关成果近日在线发表于地学期刊《链》(Catena)。

论文第一作者、在中国科学院华南植物园从事博士后研究的覃国铭表示，近年来，红树林湿地沉积物有机碳的来源和埋藏特征已成为国内外研究热点，但对河口红树林湿地相关研究较少，特别是沉积物有机碳来源和生物地球化学循环过程亟须开展深入研究。

研究通过分析不同潮位下土壤中总有机碳、总氮、稳定碳氮同位素值及植物来源生物标志物——木质素酚，区分土壤有机碳的来源。将碳和氮(C/N)的比值与木质素酚生物标志物结合使用，已被证明是揭示有机碳来源的有效方法。

基于 C/N 比值与稳定同位素  $\delta^{13}C$  的三元端元贝叶斯混合模型结果显示，近岸红树林群落土壤中，有机碳的主要来源是原位植物，其贡献占比为 62%，其次是陆源 27%和海源 11%的贡献。随着远离海岸线，靠海红树林群落中土壤有机碳的来源逐渐转变为陆源 43%、海源 35%。潮位的高位和植被类型被认为是影响土壤有机碳来源的重要因素。

“我们建议加强沿海植被的保护与管理，以确保这些生态系统能够充分发挥其作为高效碳汇的功能。”论文通讯作者、中国科学院华南植物园研究员王法明表示，该研究不仅深入探讨了红树林湿地中有机碳的来源及其动态变化，而且为未来蓝碳平衡的监测和湿地管理提供了重要的科学依据。

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108401>

山东大学

# 快速热冲击法合成超小高熵氧化物纳米颗粒

本报讯(记者廖洋 通讯员车慧卿)近日，山东大学教授张进涛团队关于高熵氧化物纳米颗粒在二氧化碳电催化还原中的空间结构调控研究获得新成果。相关论文发表于《先进材料》。

近年来，高熵氧化物凭借其多元素组成和独特的催化性能引发了广泛关注。这些材料能够通过多金属阳离子之间的协同作用，调整其晶体结构和局部对称性，从而在各种催化反应中有优异的表现。虽然高熵氧化物在理论上具有出色的催化能力，但其实际应用仍面临诸多挑战。

该研究提出了一种通过快速热冲击法合成超小高熵氧化物纳米颗粒(小于 5 纳米)的新策略，并以此开发出一种低对称性的 BiSbInCdSn-O<sub>x</sub> 催化剂，首次揭示了该催化剂在电催化二氧化碳还原反应中的卓越表现。研究表明，该催化剂不仅具有较低的反应过电位和极高的甲酸法拉第效率，还在长时间的稳定性测试中展现出优异的耐久性。

密度泛函理论计算进一步揭示了 BiSbInCdSn-O<sub>x</sub> 催化剂中铋和锑位点之间的电子供受体相互作用。这一关键机制有效降低了二氧化碳转化为甲酸的能垒，促进了二氧化碳的吸附和氢化反应，从而提高了催化活性和稳定性。研究结果表明，BiSbInCdSn-O<sub>x</sub> 作为一种高效的电催化剂，为二氧化碳转化或高附加值化学品提供了新途径。

该发现为设计高效的高熵氧化物催化剂提供了新思路，推动了二氧化碳电催化转化技术的发展，也为其他类型高熵材料的催化应用开辟了新方向。这项工作还为未来实现低碳能源转型提供了重要的科学依据与技术支持。

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1002/adma.202409949>