

内蒙古道虎沟中侏罗世昆虫化石元素成分初步分析及其埋葬学指示

王博^{①③}, 李建峰^{②③}, 方艳^①, 张海春^①

① 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008;

② 中国科学院广州地球化学研究所边缘地质重点实验室, 广州 510640;

③ 中国科学院研究生院, 北京 100049

E-mail: savantwang@gmail.com

2008-09-16 收稿, 2008-10-21 接受

国家自然科学基金(批准号: 40872015, 40523004 和 40632010)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB806400)和中国科学院研究生科学与社会实践资助专项基金资助项目

Wang B, Li J F, Fang Y, et al. Preliminary elemental analysis of fossil insects from the Middle Jurassic of Daohugou, Inner Mongolia and its taphonomic implications. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(5): 783—787, doi: 10.1007/s11434-008-0561-5

摘要 利用扫描电子显微镜观察内蒙古中侏罗世道虎沟昆虫化石的保存情况, 并利用 X 射线能谱分析了部分压型化石和黄铁矿化昆虫化石的元素含量及分布. 研究发现道虎沟生物群中绝大部分昆虫压型化石成分是虫体原始成分的有机降解产物. 少部分化石表面富集有 Fe 元素, 这可能是在降解初期由生物聚合物吸收形成. 而黄铁矿化昆虫化石的发现则表明道虎沟部分昆虫化石在形成过程中也存在“化石封套”模式. 这些不同的保存形式, 反映了不同的化石化过程, 表明当时的湖泊体系存在着不同的微环境.

关键词
内蒙古
中侏罗世
道虎沟
昆虫化石
埋葬学

昆虫化石的研究尽管已经超过了 200 年, 但其保存机理却一直困扰着古昆虫学家^[1,2]. 近 10 年来, 对昆虫的埋葬学研究取得了一些重要进展^[3~13], 但研究主要集中于化石化之前的物理保存过程^[3~6], 关于昆虫化石化学成分的分析研究也主要集中于琥珀^[7,8]和一些新生代的标本^[9~13], 而对于中生代昆虫压型化石的化学性质及化石化过程的细致研究则较少^[4]. 目前, 国内外学者对早期节肢动物埋葬学研究已取得一系列进展^[14~17], 其相对成熟的研究方法和技术为中生代陆生节肢动物(主要是昆虫)的埋葬学研究提供了参考. 尽管我国中生代昆虫化石异常丰富, 其保存的质量和数量远远超过其他地区, 但对其埋葬学研究仍是空白领域. 内蒙古赤峰市宁城县道虎沟地区出产了大量保存精美的动植物化石^[18~21], 其中丰富的昆虫化石为研究中生代昆虫演化提供了大量珍贵材料. 这些昆虫化石成因与辽西的热河生物群类似, 都与火山作用密切相关. 因此, 道虎沟昆虫化石具有很强的代表性, 是研究

东北地区中生代昆虫化石埋葬学的一个重要窗口.

1 材料和方法

双翅目、半翅目、直翅目和鞘翅目是昆虫化石库中常见的 4 个类群. 我们从内蒙古道虎沟地区选取了各类群的代表分子, 同时这些标本也反映了道虎沟生物群昆虫化石 3 种保存方式. 标本 NIGP149368 为一半翅目原沫蝉的压型化石, 身体为褐色, 腹部分节明显. 标本 NIGP149369 为一直翅目鸣螽的压型化石, 身体强烈变形, 化石为灰褐色. 依据我们的收集, 道虎沟昆虫群绝大部分压型化石(超过 99%)都是以此种方式保存的. 标本 NIGP149370 为一双翅目身体的压型化石, 其翅已丢失, 身体为褐色, 腹部分节明显. 少部分双翅目、膜翅目和脉翅目压型化石(不足 1%)是以此种方式保存. 该类型化石与第一种方式保存的化石在光学显微镜下不易分辨, 仅是颜色略偏黄. 只有元素分析表明两者有较大差别(见下文). 标本 NIGP149371 为一矿化的甲虫,

略呈立体保存. 附肢缺失, 鞘翅略破碎, 表面呈黄褐色, 部分翅面瘤点清晰. 标本 NIGP149371 的保存方式在道虎沟昆虫群中较为罕见, 主要见于极少量的鞘翅目标本. 被检验的化石均保存在胶结紧密的灰白、灰黄色薄层凝灰质粉砂岩中, 化石表面多布有深色叶肢介化石. 所有标本保存于中国科学院南京地质古生物研究所.

标本的扫描电子显微镜观察及 X 射线能谱分析均于中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室进行. 所测样品被切割成合适大小, 并将其下表面打磨平整 (样品用于观察的上表面不进行打磨, 避免破坏标本形貌), 然后用蒸馏水清洗样品以消除粉尘对其表面造成的污染, 置于干燥器中晾干. 待样品完全干燥后, 将样品放入 Quanta 400 扫描电子显微镜 (工作电压为 20 kV; 为保证样品不受污染以及后期测试分析的需要, 未对样品进行镀膜), 在电镜允许的低真空模式 (样品室压力为 100 Pa) 下进行观察和测试, 并选择合适的区域进行能谱的面扫描和点成分分析. 能谱为 EDAX 公司生产的 Genesis 2000, 其探测器型号为 SUTW-Sapphire, 能谱探头每次分析的接受时间为 90~120 s 左右, 以保证其具有较高的定量精度.

2 分析结果

标本 NIGP149368 和 NIGP149369 中 C 和 Ca 的元素含量明显高于围岩, 其他元素含量比围岩低或无明显差异 (表 1). 标本 NIGP149368 部分身体的 BSE (背散射电子) 图像表明化石中碳的元素含量也不均匀, BSE 图像中颜色越暗的区域表明碳元素含量越高 (图 1(c)). C 和 Ca 的元素分布图与标本的腹部轮廓较好地吻合, 而且 C 元素分布图中的斑状明亮区域也恰好与 BSE 图像中暗色区域相吻合 (图 1(c)~(e)). 标本 NIGP149370 中 C 和 Fe 的元素含量都较高, 约为围岩的 2 倍, 而其他元素含量都低于围岩 (表 1).

另外, 标本 NIGP149370 中 Fe 的元素分布图与标本的轮廓很好地吻合 (图 1(g)). 标本 NIGP149371 主要由黄铁矿构成, 化石中的 Fe 和 S 元素含量大大超过围岩. 该标本中部分黄铁矿被氧化, 使化石略带红褐色. 通过扫描电子显微镜观察发现黄铁矿主要富集在鞘翅化石表面, 远离鞘翅化石的围岩上黄铁矿很少, 鞘翅化石表面存在的黄铁矿主要由不同形状的集合体构成, 构成集合体的微晶粒的粒径为 0.5~1 μm (图 2).

3 讨论

昆虫表皮多由几丁质构成, 其化学性质相对稳定, 在缺氧环境下可以长时间保存^[2]. 因此, 昆虫中表皮较厚且骨化程度高的部分更容易保存为化石. 所以, 蜚蠊目覆翅和鞘翅目鞘翅化石可以广泛分布于全球. 但是化石几丁质都发现于新生代的昆虫化石中, 目前最古老的昆虫几丁质来自于德国渐新世的象甲^[13]. 比其更古老的昆虫化石的几丁质成分已明显发生了改变^[22]. 在成岩过程中, 生物聚合物 (例如几丁质和纤维素) 的降解产物可以通过随机地聚合和缩聚作用形成更稳定的有机化合物^[9]. 另外, 实验证明原位聚合作用 (*in situ* polymerisation) 也可以将昆虫遗体中不稳定的脂类聚合成较稳定的脂肪族化合物而保存下来^[22~24]. 许多古生代、中生代节肢动物 (包括昆虫) 压型化石都是由有机降解产物构成^[22]. 标本 NIGP149370, NIGP149368 和 NIGP149369 中化石表面碳含量远远超过围岩的碳元素含量, 表明化石的主要成分应是虫体原始成分的有机降解产物, 或称之为生物聚合物 (biopolymer). 目前, 已有多种降解产物在昆虫化石中发现, 而不同产地的昆虫化石的降解产物也有差异^[9,11]. 所以, 经过特殊的成岩作用, 道虎沟的昆虫化石已经缺失了原有的有机成分, 但其具体成分则需进一步的有机化学分析.

表 1 图 1 所示 6 个点的元素含量^{a)}

		C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
NIGP149368 (化石)	wt%	28.75	35.08	0.27	4.26	23.30	4.60	3.48	—
	at%	41.28	37.82	0.19	2.72	14.31	2.03	1.50	—
NIGP149368 (围岩)	wt%	—	43.38	0.42	8.59	37.77	9.83	—	—
	at%	—	58.38	0.40	6.86	28.95	5.41	—	—
NIGP149369 (化石)	wt%	46.58	25.54	0.15	3.46	13.75	5.94	3.02	0.75
	at%	60.94	25.08	0.10	2.01	7.69	2.39	1.18	0.21
NIGP149369 (围岩)	wt%	6.51	46.24	0.29	6.33	34.07	4.59	—	1.50
	at%	10.72	57.15	0.24	4.64	23.99	2.32	—	0.53
NIGP149370 (化石)	wt%	14.64	44.29	0.73	6.36	25.33	3.42	0.89	4.34
	at%	22.82	51.82	0.56	4.41	16.88	1.64	0.41	1.46
NIGP149370 (围岩)	wt%	7.66	42.40	1.00	8.36	31.70	4.94	1.11	2.84
	at%	12.83	53.30	0.83	6.23	22.70	2.54	0.56	1.02

a) “—”为未检出; wt%为质量分数; at%为原子数分数

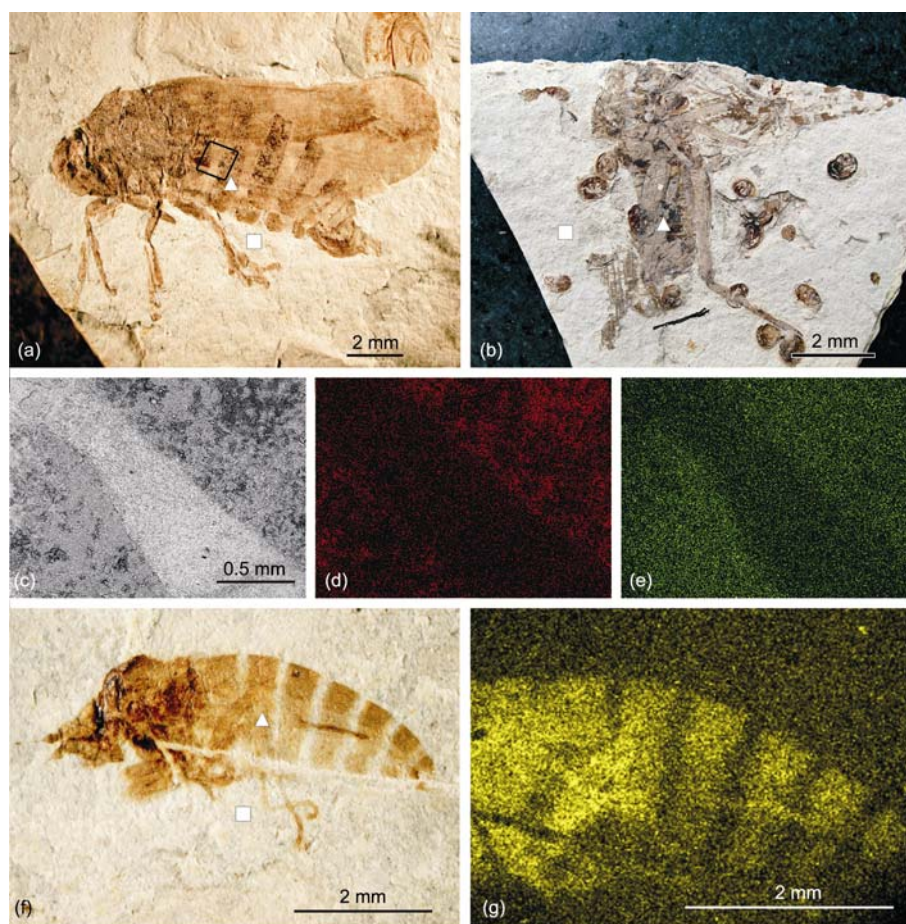


图 1

(a) 半翅目沫蝉化石的光学显微镜图片, 标本编号: NIGP149368, 产地和层位: 内蒙古道虎沟中侏罗统; (b) 直翅目鸣螽化石的光学显微镜图片, 标本编号: NIGP149369, 产地和层位: 内蒙古道虎沟中侏罗统; (c)~(e) 依次为 NIGP149368 部分身体(图黑框区域)的 BSE 图像, C, Ca 元素面分布图; (f) 双翅目化石的光学显微镜图片, 标本编号: NIGP149370, 产地和层位: 内蒙古道虎沟中侏罗统; (g) 标本 NIGP149370 部分身体的 Fe 元素面分布图. 图中三角为化石能谱成分分析微区位置, 方框为围岩能谱成分分析微区位置

昆虫在不同的微环境下可能会有不同的化石化过程. 因此, 对于同一岩层中不同昆虫化石以及不同岩层的昆虫化石, 其经历的化石化过程可能不同^[2]. 黏土矿物在世界许多重要化石库的形成中起了至关重要的作用^[4,25]. 但标本 NIGP149368 和 NIGP149369 中只有 C 和 Ca 的元素含量明显高于围岩, 而其他元素含量比围岩低或无明显差异, 表明黏土矿物在此类化石形成中可能没有重要作用. 标本中含量较高的 Ca 元素可能来自于化石化过程中富集的碳酸钙. 碳酸钙也广泛分布于其他陆相昆虫化石中, 其不能保存软体组织的结构, 但是可以填充腐败过程产生的空腔, 加快成岩速度, 进而促进化石的形成^[4]. 标本 NIGP149370 化石成分与其他两块化石的明显差异在于其富集的 Fe 元素较多, 而且 Fe 的含量明显高于围

岩. Petrovich^[26]在研究布尔吉斯页岩生物群的成因时认为生物聚合物能够吸收 Fe(III) 还原菌释放的 Fe^{2+} , 而被吸收的 Fe^{2+} 可以阻止生物聚合物被细菌进一步降解. 因此标本 NIGP149370 昆虫躯体上富集的铁元素很可能是在降解初期由生物聚合物吸收的.

黄铁矿矿化是化石化的主要途径之一, 常见于动物软体组织和植物化石^[15,25]. 一些新生代黄铁矿化的甲虫化石也有报道^[1], 但昆虫化石中黄铁矿的赋存形式以及古环境意义则较少涉及. 冷琴和杨洪^[27]发现热河生物群中的植物和脊椎动物羽毛化石上存在原位黄铁矿莓状体, 分析表明这些化石在初期快速降解所形成的“化石封套”可能为黄铁矿莓状体的形成提供了必要条件. 标本 NIGP149371 中黄铁矿化甲虫化石的发现, 表明上述埋葬过程及微环境也可

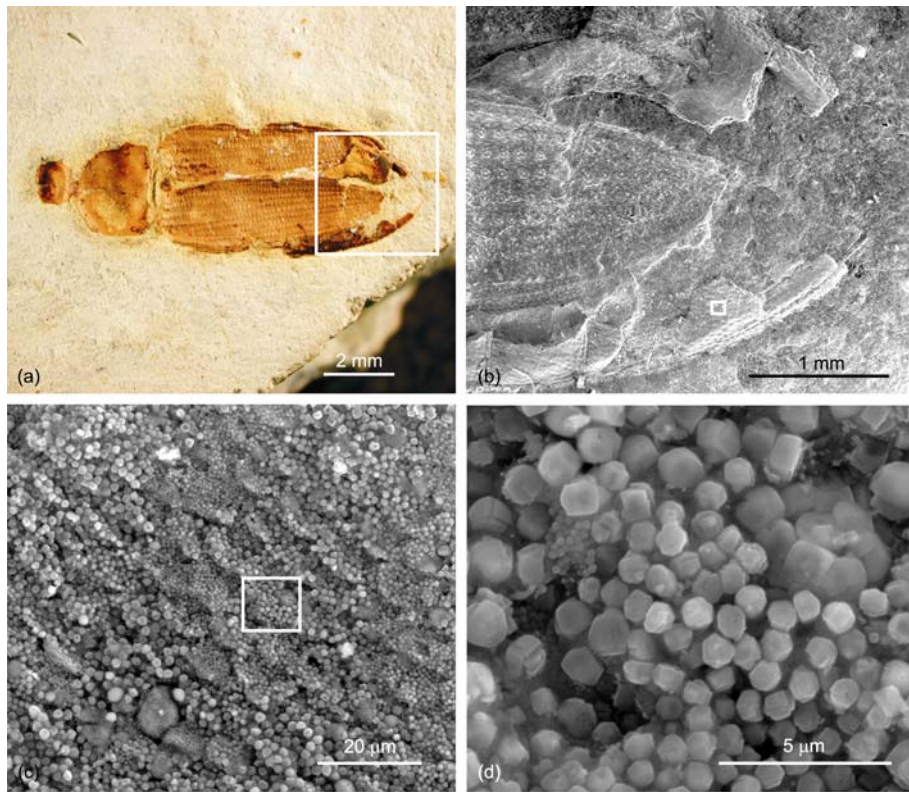


图 2

(a) 甲虫化石的光学显微镜图片, 标本编号: NIGP149371, 产地和层位: 内蒙古道虎沟中侏罗统; (b)~(d) 分别为(a)~(c)中白框指示部分的扫描电子显微镜图片

能存在于道虎沟生物群中部分昆虫化石化过程中。一般而言, 黄铁矿化过程是在生物遗体已经发生腐烂的情况下形成的, 能对生物构造起到破坏作用, 而矿化之前的快速降解过程也会导致一些微观形态的丢失^[16,17], 所以此类昆虫化石的轮廓能被较好地保存下来, 但许多微细结构却未保存。黄铁矿的保存形式及集合体形态特征可以很好地反映相关的沉积环境^[4,16,27]。但是, 道虎沟生物群中黄铁矿化的昆虫化

石非常少, 所以黄铁矿的古环境意义研究还需要进一步化石采集和分析。

综上所述, 内蒙古中侏罗世道虎沟生物群中存在多种昆虫化石保存形式, 反映了不同的化石化过程, 进而表明当时的湖泊体系中存在着不同的微环境。但是, 不同的保存形式与微环境如何对应则需要进一步的分析。另外, 各种微环境如何影响了化石的形成也需要更细致的研究。

致谢 袁训来研究员认真审阅了全文, 胡杰博士、西北大学蔡耀平博士和南京大学孟繁巍博士给予了大量建议, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Grimaldi D, Engel M S. Evolution of the Insects. New York: Cambridge University Press, 2005. 42—50
- 2 Zhehikhin V V. Pattern of insect burial and conservation. In: Rasnitsyn A P, Quicke D L J, eds. History of Insects. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2002. 17—63
- 3 Duncan I J, Titchener F, Briggs D E G. Decay and disarticulation of the cockroach: Implications for preservation of the blattoids of Writhlington (Upper Carboniferous), UK. *Palaos*, 2003, 18: 256—265^[doi]

- 4 Martínez-Delclòs X, Briggs D E G, Peñalver E. Taphonomy of insects in carbonates and amber. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2004, 203: 19—64[[doi](#)]
- 5 Smith D M, Cook A, Nufio C R. How physical characteristics of beetles affect their fossil preservation. *Palaaios*, 2006, 21: 305—310[[doi](#)]
- 6 Smith D M, Moe-Hoffman A P. Taphonomy of Diptera in lacustrine environments: A case study from Florissant Fossil Beds, Colorado. *Palaaios*, 2007, 22: 623—629
- 7 Henwood A. Exceptional preservation of dipteran flight muscle and the taphonomy of insects in amber. *Palaaios*, 1992, 7: 203—212[[doi](#)]
- 8 Stankiewicz B A, Poinar H N, Briggs D E G, et al. Chemical preservation of plants and insects in natural resins. *Proc R Soc B-Biol Sci*, 1998, 265: 641—647[[doi](#)]
- 9 Briggs D E G. Molecular taphonomy of animal and plant cuticles: Selective preservation and diagenesis. *Philos Trans R Soc B-Biol Sci*, 1999, 354: 7—16[[doi](#)]
- 10 Duncan I J, Briggs D E G. Three-dimensionally preserved insects. *Nature*, 1996, 381: 30—31[[doi](#)]
- 11 Gupta N S, Briggs D E G, Collinson M E, et al. Molecular preservation of plant and insect cuticles from the Oligocene Enspel Formation, Germany: Evidence against derivation of aliphatic polymer from sediment. *Org Geochem*, 2007, 38: 404—418[[doi](#)]
- 12 McCobb L M E, Duncan I J, Jarzembowski E A, et al. Taphonomy of the insects from the Insect Bed (Bembridge Marls), Late Eocene, Isle of Wight, England. *Geol Mag*, 1998, 135: 553—563[[doi](#)]
- 13 Stankiewicz B A, Briggs D E G, Evershed E P, et al. Preservation of chitin in 25 million-year-old fossils. *Science*, 1997, 276: 1541—1543[[doi](#)]
- 14 韩健, 舒德干, 张志飞, 等. 早寒武世澄江化石库软躯体化石富集层研究初探. *科学通报*, 2006, 51(5): 565—574
- 15 张兴亮, 舒德干. 试论动物非矿化组织的保存. *沉积学报*, 2001, 19: 13—19
- 16 蔡耀平, 华洪. 高家山生物群中的黄铁矿化作用. *科学通报*, 2006, 51(20): 2404—2409
- 17 Zhu M Y, Babcock L E, Steiner M. Fossilization modes in the Chengjiang Lagerstätte (Cambrian of China): Testing the roles of organic preservation and diagenetic alteration in exceptional preservation. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 220: 31—46[[doi](#)]
- 18 Huang D Y, Nel A, Shen Y B, et al. Discussions on the age of the Daohugou fauna—Evidence from invertebrates. *Prog Nat Sci*, 2006, 16(Special Issue): 308—312
- 19 Ji Q, Luo Z X, Yuan C X, et al. A swimming mammaliaform from the Middle Jurassic and ecomorphological diversification of early mammals. *Science*, 2006, 311: 1123—1127[[doi](#)]
- 20 Meng J, Hu Y M, Wang Y Q, et al. A Mesozoic gliding mammal from northeastern China. *Nature*, 2006, 444: 889—893[[doi](#)]
- 21 Zhou Z Y, Zheng S L, Zhang L J. Morphology and age of *Yimaia* (Ginkgoales) from Daohugou Village, Ningcheng, Inner Mongolia, China. *Cretac Res*, 2007, 28: 348—362[[doi](#)]
- 22 Stankiewicz B A, Briggs D E G, Evershed R P. Chemical composition of Paleozoic and Mesozoic fossil invertebrate cuticles as revealed by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry. *Energy Fuels*, 1997, 11: 515—521[[doi](#)]
- 23 Gupta N S. Evidence for the *in situ* polymerisation of labile aliphatic organic compounds during the preservation of fossil leaves: Implications for organic matter preservation. *Org Geochem*, 2007, 38: 499—522
- 24 Gupta N S, Michels R, Briggs D E G, et al. The organic preservation of fossil arthropods: An experimental study. *Proc R Soc B-Biol Sci*, 2006, 273: 2777—2783[[doi](#)]
- 25 Briggs D E G. The role of decay and mineralization in the preservation of soft-bodied fossils. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2003, 31: 275—301[[doi](#)]
- 26 Petrovich R. Mechanisms of fossilization of the soft-bodied and lightly armored faunas of the Burgess Shale and some other classical localities. *Am J Sci*, 2001, 301: 683—726[[doi](#)]
- 27 冷琴, 杨洪. 中国东北热河生物群及沉积物中的黄铁矿霉状体及其对早期化石化阶段沉积微环境的指示. *自然科学进展*, 2003, 12: 359—364