



辽宁及其邻区高精度航磁数据分析：对区域性断裂带与岩石圈热结构约束

期刊:	《地球科学》
稿件 ID	ES-2022-0072.R2
稿件类型:	论文
作者提交的日期:	2022-3-11
完整作者列表:	高, 维; 中国自然资源航空物探遥感中心, 舒, 晴; 中国自然资源航空物探遥感中心 郭, 志宏; 中国自然资源航空物探遥感中心 孟, 庆奎; 中国自然资源航空物探遥感中心 张, 凯淞; 中国自然航空物探遥感中心 陈, 立梅
关键词:	航磁异常, 居里面深度, 岩石圈厚度, 辽宁
研究方向:	应用地球物理

注：以下文件由作者提交进行同行评审，但是无法转换为 PDF。您必须在线查看这些文件（如视频文件）。

- 图2 高维-地球科学-2022 辽宁及其邻区总磁场异常图 X3.cdr
- 图3 高维-地球科学-2022 辽宁及其邻区大地热流值(Qs)和居里面深度(Zb)的关系图X3.cdr
- 图4 高维-地球科学-2022 辽宁及邻区航磁异常化级与区域性深大断裂带 X3.cdr
- 图5 高维-地球科学-2022 辽宁及邻区居里等温面深度图 X3.cdr
- 图6 高维-地球科学-2022 辽东半岛与渤海湾岩石圈厚度图 X3.cdr

SCHOLARONE™
Manuscripts

in press

1 辽宁及其邻区高精度航磁数据分析：对区域性断裂带与 2 岩石圈热结构约束

3 高维^{1*}, 舒晴¹, 郭志宏¹, 孟庆奎¹, 张凯淞¹, 陈丽梅^{2,3}

- 4 1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京, 100083
- 5 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037
- 6 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083

7
8
9
10 **摘要** 高精度航磁数据分析与挖掘是揭示区域性断裂带空间展布与岩石圈热结构重
11 要手段之一。为了揭示辽宁及其区航磁异常与区域性断裂带关系, 估算其居里面深
12 度与岩石圈厚度, 本文在对航磁数据进行化极的基础上, 利用功率谱法反演了研究
13 区居里面深度; 采用一维稳态热传导方程, 计算了辽东-渤海湾地区岩石圈厚度。研
14 究表明: (1) 辽东、辽西与渤海湾地区存在多条北东向/北北东向航磁异常带, 它
15 们是晚中生代以来太平洋板片俯冲作用背景下, 活动大陆边缘长期伸展与短暂挤压
16 状态交替演变的产物; 而辽北地区被北东向磁异常带错断的近东西/北西西向航磁异
17 常带, 则是古亚洲洋闭合后碰撞造山晚期伸展抬升至中地壳层次的构造形迹。(2)
18 辽宁及其邻区居里面深度介于 16~40 km 之间, 平均深度为 28 km, 阜新与盘锦等
19 居里面隆起区对应的大地热流值相对偏高; 而沈阳与辽源居里面坳陷区对应的大地
20 热流值偏低。(3) 辽宁及其邻区岩石圈厚度具有空间非均匀性, 变化范围为 70~
21 150 km, 平均值为 100 km; 郯庐断裂带附近的营口-鞍山地区下方岩石圈厚度最薄,
22 为 60~80 km; 辽东与渤海湾地区岩石圈厚度空间非均匀性可能是晚中生代以来太
23 平洋板片俯冲诱导的上升流与克拉通岩石圈内部先存的构造薄弱带共同作用的结果。

24 **关键词:** 辽宁; 航磁异常; 居里面深度; 岩石圈厚度

25 中图分类号: 文章编号: 收稿日期:

26 **Analysis of high precision aeromagnetic data in Liaoning and its** 27 **adjacent areas: Constraints on regional fault zones and**

28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53 **基金项目:** 本文受自然资源部中国地质调查局二级项目 (Nos. DD2189410, DD20190001, DD20190003 和 DD20190037) 资助

54 **作者简介:** 高维, (1983—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事航空物探综合研究. ORCID:
55 0000-0003-4129-8619. E-mail: gw551121@163.com
56
57
58
59
60

28

lithospheric thermal structure

29

GaoWei¹, Shu Qing¹, Guo Zhihong¹, Zhang Kaisong¹, Chen Limei^{2, 3}

30

1. *China Aero Geophysical survey and Remote Sensing Center for Lang and Resources, Beijing 100083, China*

31

2. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

32

3. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

33

Abstract: Analysis and mining of high-precision aeromagnetic data is one of the important methods to reveal the spatial distribution of regional deep fault zones and lithospheric thermal structure. In order to reveal the relationship between the aeromagnetic anomaly and the regional fault zones and estimate the Curie-point depths and lithospheric thicknesses in Liaoning and its adjacent areas. In this contribution, based on reduction to pole of aeromagnetic data, the Curie-point depths are calculated by the power spectrum method in the studied areas. Meanwhile, the lithospheric thicknesses of the eastern segments of Liaoning are calculated by the 1D stable thermal conduction equations. Our new aeromagnetic data reveals that there are several NE/NNE striking aeromagnetic anomaly zones in the eastern and western parts of Liaoning and the Bohai Bay, which are interpreted as the products of the alternation of long-term extension and brief compression of the active continental margins under the background of the Pacific plate subduction since the late Mesozoic. The near NW/NWW striking aeromagnetic anomaly zones in the northern segments of Liaoning, which are interrupted by the NE/NNE striking magnetic anomaly zones, are interpreted as the tectonic traces which were extended and uplifted to the middle crust after the closure of the Paleo-Asian Ocean during the late collisional orogeny. Our aeromagnetic anomalies also show that the estimated Curie-point depths of Liaoning and its adjacent areas ranges from 16 to 40 km, with an average depth of 28 km. The heat flow values of the Fuxin and Panjin Curie uplifted are relatively higher. However, the heat flow values of the Shenyang and Liaoyuan Curie depression is relatively lower. The estimated lithospheric thicknesses of the Liaoning and its adjacent areas are spatially heterogeneity, ranging from 70 km to 150 km with an average of 100 km. The estimated lithospheric thickness of the Yingkou-Anshan area near the Tan-Lu fault zone is the thinnest with a thicknesses of 60 ~ 80 km. The spatial heterogeneity of regional thermal lithospheric thicknesses in the eastern segments of Liaoning and Bohai Bay most likely result from the combined

60 effects of a spatially heterogeneity distribution of wet upwellings triggered by the
61 subducted Pacific slab and pre-existing weak zones in the cratonic lithosphere since the
62 Late Mesozoic.

63

64 **Key words** Liaoning; aeromagnetic anomaly; Cure-point depth; lithospheric thickness

65

66 0 引言

67 华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一，拥有38亿年物质记录与演变历史
68 ([Liu et al., 1992](#))，于19.5~18.5亿年最终克拉通化 ([Zhao et al., 2005, 2012](#); [Zhai
69 and Santosh, 2011, 2013](#))，自18.5亿年克拉通化一直保持相对稳定，并保留有巨厚的
70 岩石圈根 ([池际尚与路凤香, 1996](#); [Gao et al., 2002](#))。但在晚中生代期间，华北克拉
71 通尤其是其东部地区，岩石圈厚度明显减薄，古老的、难熔的岩石圈地幔被年轻的、
72 亏损的大洋岩石圈地幔所取代，从而失去了克拉通的稳定性，这个过程通常被称为
73 华北克拉通破坏 ([Wu et al., 2014, 2018](#); [Zhu and Xu, 2019](#); [Zhu and Sun, 2021](#))。近20
74 年来，国内外众多学者以华北克拉通破坏为主题进行了深入而系统的多学科综合研
75 究 ([Wu et al., 2014, 2018](#); [Zhu and Xu, 2019](#); [Zhu and Sun, 2021](#))，并取得大量创新性
76 研究成果，华北克拉通破坏已从地震学、地热学、构造地质学、沉积地质学、同位
77 素地质学与地幔岩石学等方面得到了证实 ([Chen et al., 2009, 2014](#); [Wu et al., 2014,
78 2018](#); [Zheng et al., 2018](#); [Zhu et al., 2018](#); [Zhu and Xu, 2019](#); [Lin et al., 2021](#); [Zheng et
79 al., 2021](#))，并形成了一些基本共识，如晚中生代大规模壳熔花岗岩和壳内韧性变形
80 可视为华北克拉通破坏的岩石学和构造地质学标志 ([Wu et al., 2014, 2018](#))；西太平
81 洋板片的持续俯冲是控制华北克拉通破坏的一级动力学机制 ([Zhu and Xu, 2019](#))。
82 但目前对于华北克拉通（现今）岩石圈厚度空间展布特征与华北克拉通破坏的具体
83 动力学机制等依旧存在不同的认识 ([Wu et al., 2014, 2018](#); [Zhu and Xu, 2019](#))。例如，
84 [Xu et al. \(2018\)](#) 采用有限频体波层析成像，对华北克拉通区域高分辨地震数据进行
85 了新的成像研究，并揭示了华北克拉通东部地区岩石圈厚度（破坏）在空间非均匀
86 性，精细刻画华北克拉通东部岩石圈三维结构特征仍需要进一步开展多学科综合研

究来约束 (黄方等, 2015; Xu *et al.*, 2018), 同时, 对于中亚造山带向东延伸也由于后
期的覆盖和构造破坏而又不同的认识。鉴于此, 本文以辽宁及其邻区为研究对象,
利用近年来获得的高分辨率航磁数据, 在对航磁数据化极基础上, 采用功率谱法,
反演研究区居里面深度变化与分布特征; 利用一维稳态热传导方程, 结合大地热流
数据, 估算研究区岩石圈厚度及其分布特征; 结合其他地质-地球物理资料, 分析航
磁异常与区域断裂带关系; 探讨辽东-渤海湾地区居里面深度、岩石圈厚度变化与华
北克拉通破坏成因关系。在此基础上, 约束中亚造山带向东的延伸, 并估算了北东
向主干断裂带的位移量。

1 地质背景与岩石磁性特征

辽宁地区位于华北陆块东北部, 南北横跨两个一级大地构造单元, 以赤峰-开
原断裂带为界, 北侧为中亚造山带古生代增生杂岩, 南侧为华北克拉通前寒武纪变
质基底, 东侧以鸭绿江断裂带为界与朝鲜半岛狼林地块相邻 (图 1; 辽宁省地质矿
产局, 1989; Zhao *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2018, 2019a; Gu *et al.*, 2018)。辽宁及其邻区
具有长期而复杂的构造热演化历史, 鞍本地区出露有 38 亿年的岩石, 是目前已报道
的东亚地区最古老的岩石 (Liu *et al.*, 1992)。在辽南、辽北、辽西等地区广泛发育
中-新太古代变质基底 (辽宁省地质矿产局, 1989; Wang *et al.*, 2015), 主要由石英闪
长质-TTG 片麻岩与钾长-二长花岗岩, 以及少量含 BIF 的变质表壳岩 (鞍山岩群)
与变基性岩组成, 经历了绿片岩相-麻粒岩相变质, 普遍发育了北北西向面理 (片理
与片麻理) 和相关韧性剪切带 (Zhao *et al.*, 2005; Zhai and Santosh, 2013)。在辽北
龙岗陆块与辽南陆块之间为辽吉古元古代造山带, 发育古元古代辽河岩群和 22~21
亿年辽-吉花岗岩, 以青龙山-枣儿岭断裂带为界, 前人将辽河岩群进一步划分为北
辽河岩群和南辽河岩群, 二者主要由滨浅海相变质火山-沉积岩系组成, 经历了低
绿片岩-高麻粒岩相变质, 区域性面理走向呈近东西向 (Li *et al.*, 2005; Li and
Zhao, 2007; Liu *et al.*, 2019b; 刘平华, 2020; 张宇佳 2022)。研究表明辽宁地区太
古宙-古元古代变质基底磁化率变化较大, 强磁性基底主要包括含角闪石和辉石片麻
岩、含磁铁斜长角闪岩、含磁铁基性麻粒岩与磁铁石英岩等, 这些岩石的磁化率值

1
2
3 114 在 $1000 \times 10^{-5} \text{SI}$ 以上, 平均磁化率在 $3800 \times 10^{-5} \text{SI}$, 主要分布于辽北鞍山、本溪与清
4
5 115 原等地, 辽南金州和辽西建平与阜新等地, 表现为强烈升高的正异常场。中等磁性
6
7 116 基底主要由含角闪石花岗片麻岩和混合花岗岩等组成, 该类岩石磁化率介于 $300 \sim$
8
9 117 $800 \times 10^{-5} \text{SI}$ 之间, 平均磁化率在 $550 \times 10^{-5} \text{SI}$, 主要分布在辽北抚顺、辽西葫芦岛等地,
10
11 118 呈不规则条带状分布, 表现为局部升高正异常。弱磁性基底主要由新太古代-古元
12
13 119 古代花岗片麻岩组成, 磁化率介于 $50 \sim 200 \times 10^{-5} \text{SI}$, 表现为局部弱缓升高正异常;
14
15 120 而以辽河岩群为代表的古元古代变沉积岩基本无磁性, 可视为无磁性地层 (周立宏
16
17 121 等, 2004; 孟祥君等, 2016)。

18
19 122 如图 1 所示, 辽东大连、辽北抚顺与辽中本溪等地区广泛出露有中-新元古代
20
21 123 与早古生代未变质沉积地层, 中-新元古代变沉积岩主要为中-细粒碎屑岩、滨浅海
22
23 124 相砂岩、泥岩、碳酸盐岩组成。早古生代寒武—奥陶系属稳定的海相沉积岩系, 以
24
25 125 浅海相的碳酸盐岩为主, 中间夹少量的碎屑岩; 晚古生代石炭—二叠系属海陆交互
26
27 126 相, 岩石组合多以砂岩、泥质灰岩和页岩为主。研究区中生代陆相火山-沉积盆地
28
29 127 广泛发育 (图 1), 如辽宁西部的阜新-义县盆地、朝阳-北票盆地、建昌-喀左盆地,
30
31 128 沉积时代多为晚侏罗世—早白垩世, 少数盆地形成时代为早—中侏罗世。相关资料
32
33 129 表明 (江为为等, 2002; 周立宏等, 2004; 孟祥君等, 2016), 辽宁地区中-新元古界、
34
35 130 古生界、中生界和新生界地层, 均表现为微弱或无磁性, 可视为无磁性层。

36
37 131 辽宁地区显生宙岩浆岩主要形成于晚古生代-中生代, 晚古生代浆岩主要分布于
38
39 132 辽北地区, 以二长花岗岩为主, 同时发育同期少量闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长
40
41 133 岩。中生代岩浆岩主要集中分布于辽东与辽西地区, 并以早白垩世为主, 三叠纪与
42
43 134 侏罗纪岩浆岩相对较少 (吴福元等, 2005), 白垩纪岩浆岩成片状的分布于阜新、本
44
45 135 溪、丹东、岫岩、金州、盖州、瓦房店等地, 岩性从基性到酸性均有发育。研究区
46
47 136 中生代中酸性侵入岩, 磁化率介于 $20 \sim 400 \times 10^{-5} \text{SI}$, 局部发育辉长岩、闪长岩,
48
49 137 部分磁化率能达到 $1000 \times 10^{-5} \text{SI}$ 以上 (江为为等, 2002; 孟祥君等, 2016)。

50 138

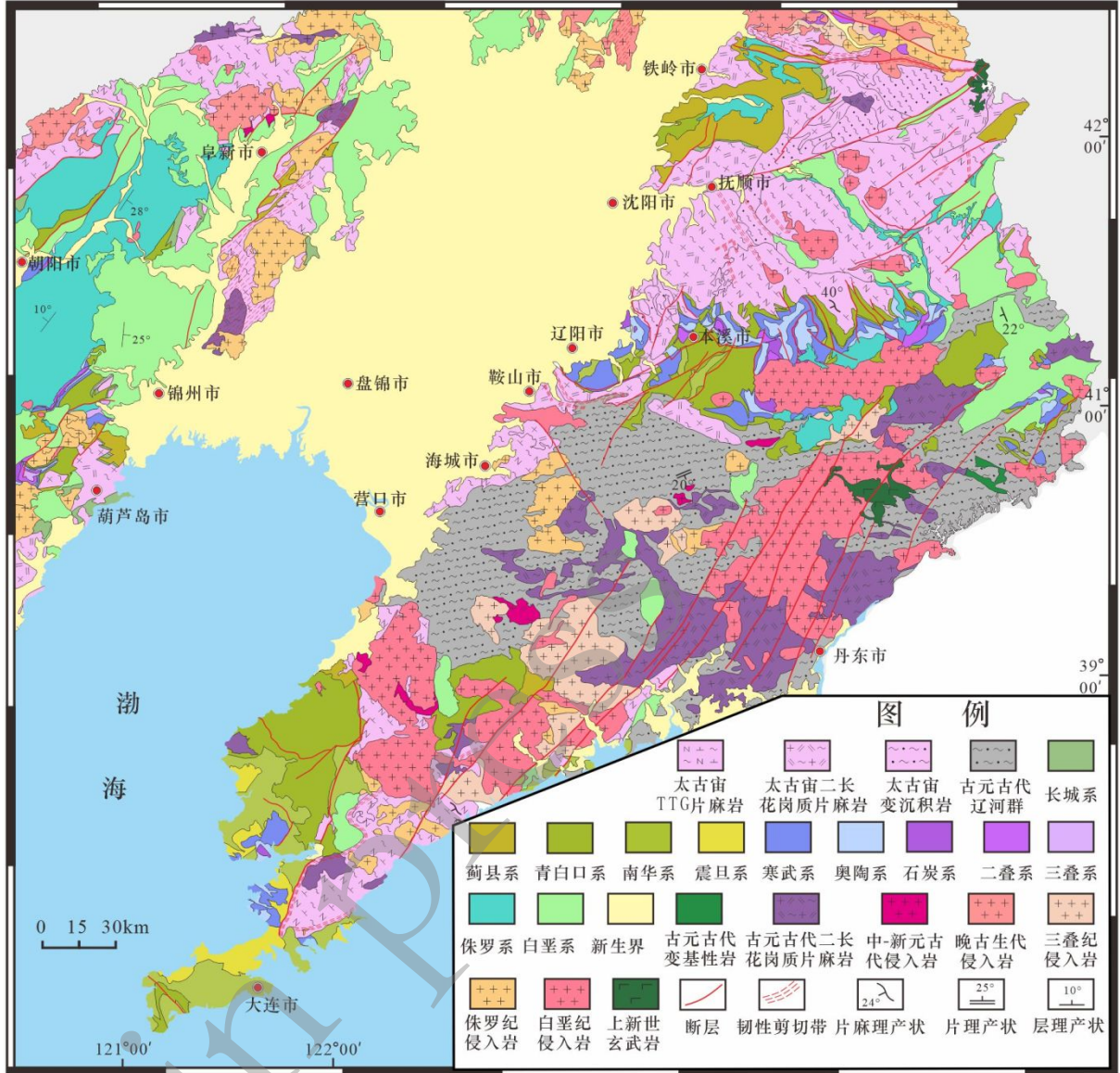


图 1 辽宁及其邻区地质简图 (据辽宁省地质矿产局, 1989修改)

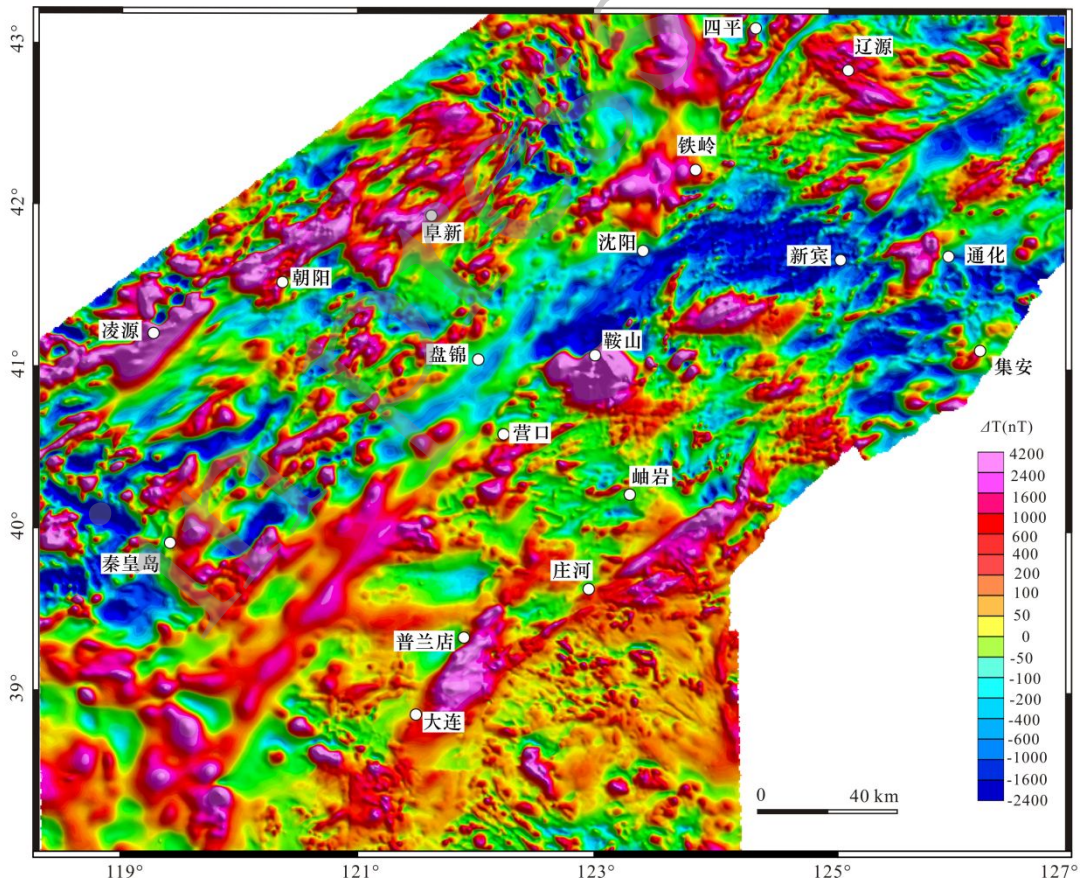
Fig.1 Geological sketch map showing the distribution of the main lithological associations in Liaoning province and its adjacent areas (Modified by Bureau of geology and mineral resources of Liaoning Province, 1989)

139
 140
 141 辽宁地区先后经历了多期次构造运动，这些构造运动塑造了本区的主要构造形
 142 迹，主要包括太古宙-古元古代中下地壳深度的韧性变形构造与晚古生代-中生代韧
 143 性-脆性构造。其中，研究区内与古太平洋俯冲有关燕山期北东向-北北东向构造带
 144 最为发育 (辽宁省地质矿产局, 1989; Gu et al., 2016)，如八里罕断裂带、郟庐断裂带、
 145 依兰-伊通断裂带、敦化-密山断裂带与鸭绿江断裂带等。在辽北地区，还发育与古
 146 亚洲洋闭合有关的東西向西拉木伦构造带和北西向赤峰-开原断裂带 (Gu et al.,
 147
 148
 149
 150

151 2018)。上述区域性断裂带构成了辽宁地区的主要构造格架，控制着该区沉积建造、
152 岩浆活动以及变质基底展布（图1）。

154 2 数据来源与计算方法

155 本文所使用的磁异常数据主要来源于中国自然资源航空物探遥感中心多年来的
156 航磁调查资料,数据涵盖的范围为:东经119°00′~127°15′,北纬38°10′~43°10′（图2）。
157 采用2015年国际地磁参考场IGRF模型（Thébault *et al.*, 2015），对航磁数据逐点进行
158 正常场改正，数据处理中采用高斯-克吕格投影，北京54椭球，中央经线东经
159 123°，处理后的航磁 ΔT 磁异常如图2所示。



160 图2 辽宁及其邻区航磁总场异常图

161 Fig. 2 Total field aeromagnetic anomaly map of Liaoning and its adjacent areas

163 2.1 航磁数据化极

164 为了减少磁场倾斜磁化的影响，造成磁异常同磁性地质体对应复杂多样，我们

165 采用频率域位场转换处理方法, 对航磁 ΔT 原始数据进行了化极处理(Baranov, 1957;
166 郭志宏等, 2003), 地磁偏角 -8.5° , 地磁场倾角 58.9° 。经化极处理后, 研究区内斜
167 磁化影响减弱, 磁场整体特征面貌、磁性体的中心位置、分布范围及形态特征有了
168 改变, 异常体北侧伴生的负异常基本消失, 许多规模较小、正负伴生的异常归并为
169 孤立的单个正异常, 并且异常中心不同程度的北移, 化极后的异常与地质体、梯度
170 带有较好的对应。

171 2.2 居里面反演

172 利用磁异常数据计算居里面的方法众多, 主要包括直接法(侯重初与李保国,
173 1985)和间接法(Spector *et al.*, 1970; Shuey *et al.*, 1977; Connard *et al.*, 1983; Okubo
174 *et al.*, 1985; Blakely *et al.*, 1988; Tanaka *et al.*, 1999; Ravat *et al.*, 2007), 本文选择间
175 接法中较为常用的功率谱法, 该方法基于Spector-Grant在统计模型的基础上提出的
176 等效理论(Spector-Grant, 1970), 磁性界面的平均深度用等效的矩形棱柱功率谱来
177 表征, 以功率谱的斜率来确定磁性界面的深度, 国内外众多学者中对该方法做了大
178 量的实践和应用(Tanaka *et al.*, 1999; Li *et al.*, 2012; Wang and Li, 2015, 2018; 高维等,
179 2020)。

180 Tanaka (1999) 在 Blakely (1988) 给出的磁异常功率谱 $\Phi_{\Delta T}(k_x, k_y)$ 的基础上,
181 推导了径向平均功率谱的表达式:

$$182 \quad \Phi_{\Delta T}(|K|) = Ae^{-2|K|Z_t} \left[1 - e^{-|K|(Z_b - Z_t)} \right]^2 \quad (1)$$

183 其中 K 是波数 (km^{-1}); Z_t 为磁性体顶面深度 (km); Z_b 为磁性体底面深度 (km); Ae
184 是与磁性体的尺度、磁化强度方向和磁场方向有关的常数; 当波长小于磁性体厚度
185 的 2 倍时, 对 (1) 式两边开方并取对数, 可近似为:

$$186 \quad \ln[\Phi_{\Delta T}(|K|)^{1/2}] = \ln B - |K|Z_t \quad (2)$$

187 其中 B 为常数, 据 (2) 式可知, 由该磁异常径向对数功率谱的斜率可估算出磁性
188 体顶面深度 Z_t (km)。另外, 方程 (1) 还可做如下变化

$$189 \quad \Phi_{\Delta T}(|K|)^{1/2} = Ce^{-2|K|Z_0} \left[e^{-|K|(Z_t - Z_0)} - e^{-|K|(Z_b - Z_0)} \right] \quad (3)$$

190 其中 C 为常数, Z_0 为磁性体中心埋深 (km)。在波长较长的波段, 方程 (3) 可改写

191 为

$$192 \quad \Phi_{Ar}(|K|)^{1/2} = Ce^{-2|K|Z_0} [e^{-|K|(-d)} - e^{-|K|(d)}] \approx Ce^{-2|K|Z_0} |K|d \quad (4)$$

193 $2d$ 为磁性体的总厚度。对 (4) 式取对数, 可得到

$$194 \quad \ln[\Phi_{Ar}(|K|)^{1/2} / |K|] = \ln D - |K|Z_0 \quad (5)$$

195 其中 D 是常数。据 (5) 式可知, 由该磁异常径向对数功率谱的斜率可估算出磁性
196 体中心深度 Z_0 (km), Z_t 为磁性体顶面深度 (km), 所以磁性体底面深度可表示为 Z_b
197 (km)

$$198 \quad Z_b = 2Z_0 - Z_t$$

199 考虑到利用谱分析方法求得的居里面反映的是平均变化趋势, 为使计算结果更加合
200 理, 我们在频率域化极数据的基础上进行了向上延拓的方法滤掉浅源磁性体的影响,
201 计算居里面数据网格距为 5 km, 确定滑动窗口大小为 100 km×100 km, 根据对数功
202 率谱计算直立棱柱体的 Z_t 顶面深度 (km) 和 Z_0 中心深度 (km), 从而间接确定居里
203 面深度。

204 2.3 岩石圈厚度计算

205 矿物岩石在温度升高约达到 550°C 时铁磁性会转变为顺磁性, 所以居里面一般也
206 代表了磁性体的下界面 (Li *et al.*, 2012), 我们为了进一步探究研究区岩石圈厚度
207 变化范围及空间变化特征, 我们在居里面深度反演结果基础上, 进一步计算岩石圈
208 厚度及对应的温度。研究表明, 采用实测大地热流值与相应的居里面深度等参数,
209 利用一维热传导方程, 可以计算岩石圈厚度与温度 (Li *et al.*, 2012; Wang and Li,
210 2015, 2018)。在本次研究过程中, 采用上述方法对研究区内岩石圈厚度进行了计算,
211 具体计算过程和条件概述如下: 假设岩石圈内部热传导仅沿垂向上发生, 岩石圈连
212 续热产量随深度增加呈指数衰减, 且磁性层底界面温度为居里温度为 550°C, 地表温
213 度设置为 5° (Li *et al.*, 2012), 根据一维热传导模型及公式 6, 利用最小二乘法对岩
214 石圈磁性层热导率进行非线性回归拟合, 得到辽宁东部地表热流值和居里面深度的
215 关系图及磁性层热导率最优解 (图 3), 即: $k=2.65 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, 同时拟合获得地表热产
216 率 $H_0=3.5\mu\text{W/m}^3$ 、热量衰减因子 $h_r=15 \text{ km}$ 。

217

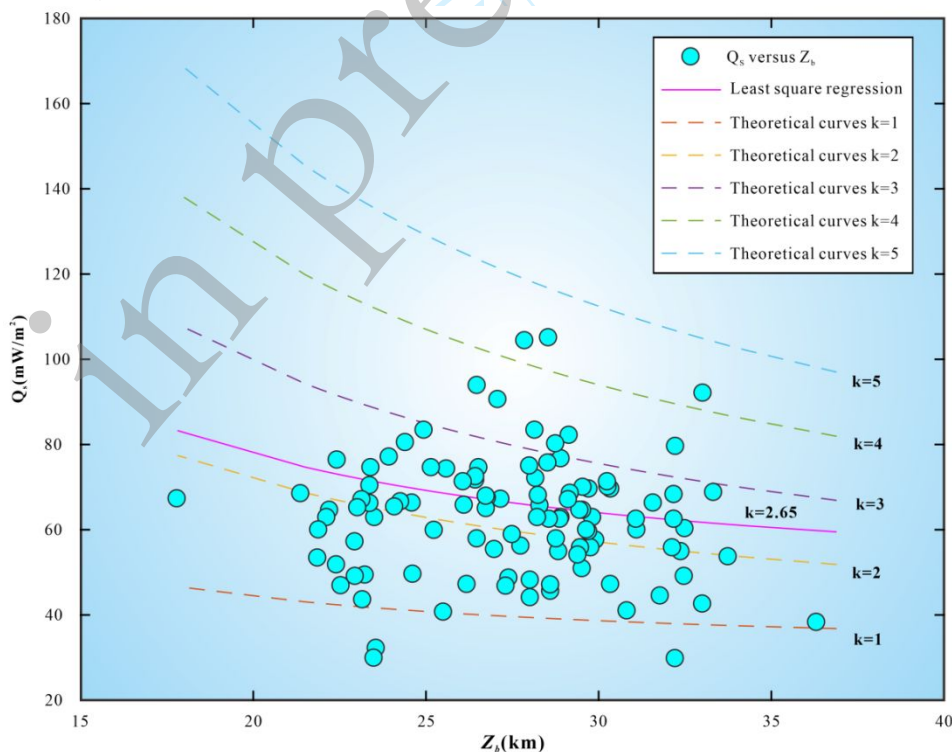
$$q_s = k \frac{T_c - T_0}{Z_b - Z_s} + h_r^2 H_0 \frac{\exp^{-z_b/h_r} - \exp^{-z_0/h_r}}{Z_b} + h_r H_0 \exp^{-z_0/h_r} \quad \text{公式 (6)}$$

其中, $T_c=550^\circ\text{C}$ 为磁性层底界面温度, $T_0=5^\circ\text{C}$ 为地表温度, Z_b 为居里面深度(km), Z_s 为地表高程(km), q_s 为大地热流值(mW/m^2), k 为岩石圈磁性层热导率($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$), H_0 为地表热产率($\mu\text{W}/\text{m}^3$), h_r 为热量随深度变化的衰减因子(km),

$$\frac{d}{dz} \left(k [T(z)] \frac{dT(z)}{dz} \right) = -H_0 \exp^{-z/h_r} \quad \text{公式 (7)}$$

其中, k 为磁性层热导率($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$); H_0 为地表热产率($\mu\text{W}/\text{m}^3$); h_r 为热产量衰减因子(km), z 为岩石圈厚度(km), $T(z)$ 为某一岩石圈厚度对应的温度($^\circ\text{C}$)。

利用随温度变化的热导率模型(Li *et al.*, 2012)和一维稳态热传导方程(公式(7); Turcotte and Schubert, 2002)进行拟合, 拟合所得结果与地幔固相线温度理论模型曲线($T_{LAB} \approx 1050 + 3Z$; Lachenbruch, 1978; 图略)的交点, 获得了辽东半岛与渤海湾地区岩石圈厚度。



229

230

图3 辽宁及其邻区大地热流值(Q_s)和居里面深度(Z_b)的关系图

231

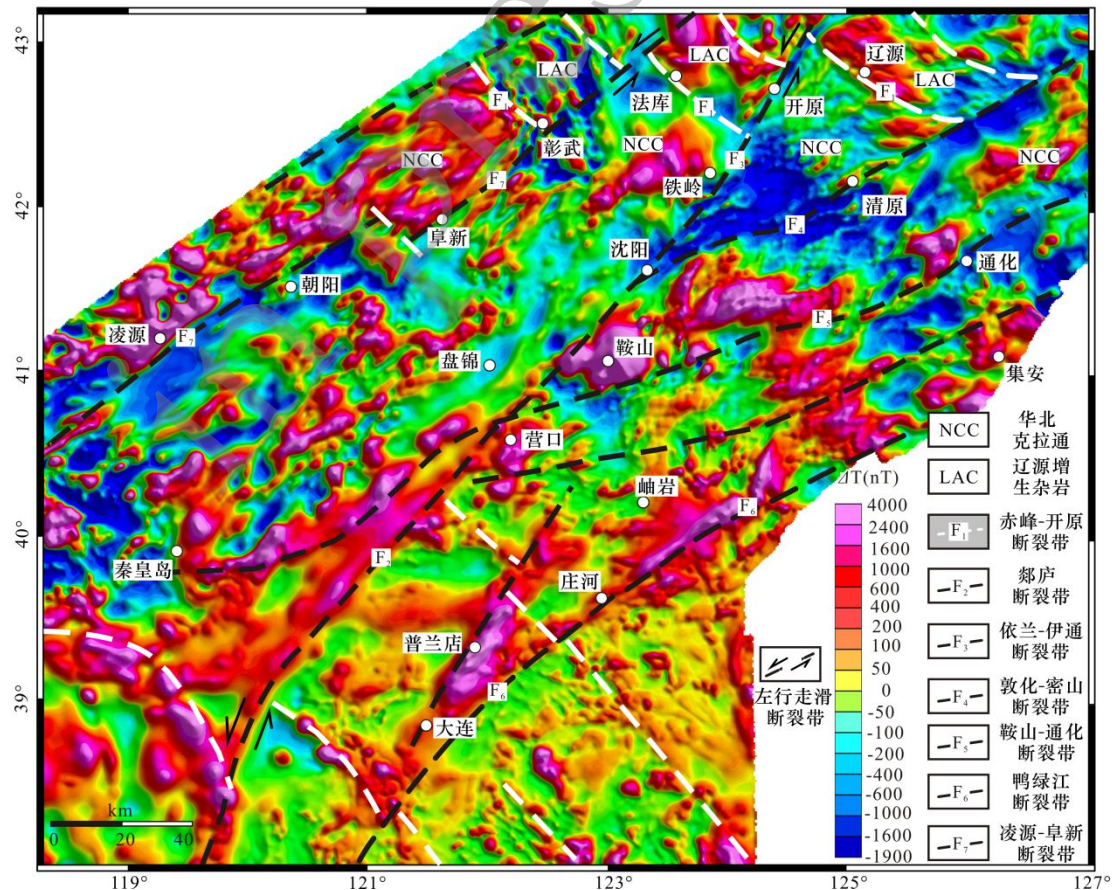
Fig.3 The correlation between terrestrial heat flow (Q_s) and Curie-point depths (Z_b) of Liaoning and its adjacent areas

232

233 3 计算结果

234 3.1 航磁化级异常

235 如图4所示, 辽宁地区航磁异常特征主要以宽缓升高的负背景场为主, 自西北向
 236 东南逐渐过渡到正背景场, 在上述背景场基础上叠加块状或条带状圈闭正异常, 异
 237 常走向多以北北东、北东向为主, 局部有北西向和近东西向。其中, 在辽西地区(凌
 238 源-朝阳-阜新) 主要以条带状圈闭的正异常为主, 成线性条带状分布, 异常轴向多
 239 为北东向, 异常强度较大, 正异常值达到4000nT; 辽北-吉南地区主要在铁岭、辽源
 240 与法库等地, 异常以条带状或块状为主, 幅值50~3800nT; 辽中、辽东和辽南地区
 241 过渡到平缓升高背景场, 异常特征以团块状和线性正异常为主, 异常幅值在-50~
 242 4200nT, 异常走向多为北东或北北东向, 局部地区为小型圆形正异常, 异常幅值较
 243 小。渤海湾盆地航磁异常形态为半环形与北东向线性异常, 异常相对舒缓, 正异常
 244 值达到3100nT(图4)。



245

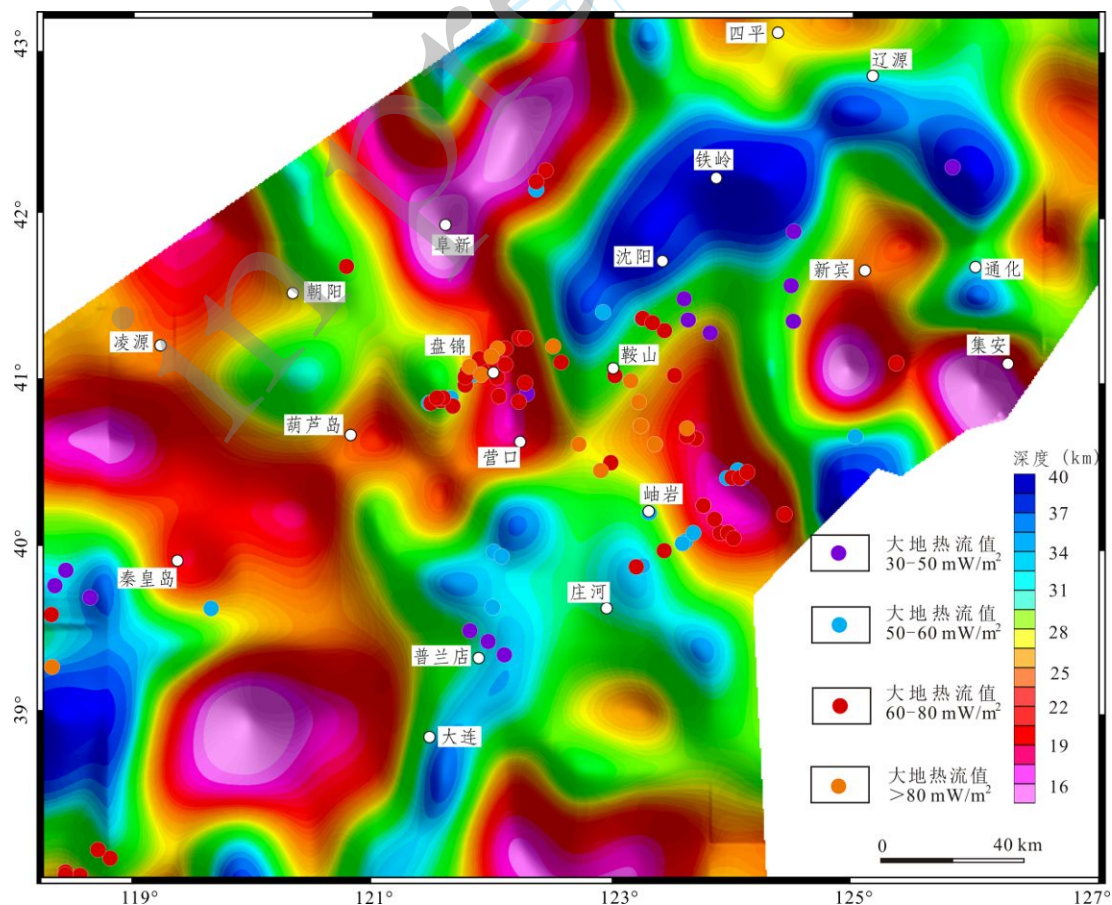
246

图4 辽宁及其邻区航磁化极异常与区域性断裂带分布简图

247 Fig.4 The distribution of reduction-to-pole of aeromagnetic anomalies and regional fault zones in
248 Liaoning and its adjacent areas

249 3.2 居里面深度

250 从图5可以看出，研究区居里面起伏深度变化较大，变化于16~40 km之间，平
251 均深度28 km（图5）。根据研究区不同构造单元居里面上隆和下拗特点，可进一步
252 划分为渤海湾-辽西隆起区、辽南拗陷区、辽东隆起区与辽北拗陷区，渤海湾-辽西
253 隆起区主要分布于渤海部分海域、朝阳、凌源与阜新等地，在朝阳以东、盘锦以西
254 等地呈现隆中拗的特征，整体居里面深度变化16~25 km之间；辽南拗陷区主要分
255 布于庄河、普兰店和大连等地，该拗陷区形态呈近南北走向，居里面深度从海上向
256 陆地过渡明显变深的趋势，变化于30~36 km之间；辽东隆起区分布于岫岩、新宾、
257 集安等地，形态呈孤立的圈闭状，其深度变化于16~28 km之间；辽北拗陷区分布
258 在沈阳、铁岭与辽源等地，其居里面深度为34~40 km，相对辽南拗陷区埋深更深，
259 该拗陷区在铁岭分布着一个较深的极值点，深度约40 km，显示辽北拗陷区地壳具
260 有“冷壳”热结构的特点，莫霍面温度低于550°C。



261

262 图5 辽宁及其邻区居里面深度图（大地热流值据 Jiang *et al.*(2019)）
263 Fig.5 The distribution of estimated Curie-point depths and terrestrial heat flow in Liaoning and its
264 adjacent areas (the terrestrial heat flow data from Jiang *et al.* (2019))

265 3.3 岩石圈厚度

266 如上所述，根据上述参数与计算公式，本次研究估算了辽东南-渤海湾地区岩
267 石圈厚度，从图6中可以看出，辽东南与渤海湾地区岩石圈厚度变化范围较大，变化
268 于60~150 km 之间（图 6），总体上，辽东南与渤海湾地区岩石圈厚度具有空间非
269 均匀性（图6; 何丽娟等, 2001）。对比居里面深度图（图5）和岩石圈厚度图（图6）
270 可知，辽东半岛及渤海湾地区居里面深度与岩石圈厚度具有十分复杂的关系，大连-
271 普兰店-营口-鞍山一带具有本区最薄的岩石厚度（最薄处约75千米），大致对应区内
272 最大断裂带——郯庐断裂带，该条带居里面深度值相对较大，平均值大约为32千米，
273 具有“冷壳热幔”的深部热状态特征；东港及其东南区域的岩石圈厚度相对较大，
274 最大厚度达150千米，对应的居里面深度值亦较大，约30千米，具有“冷壳冷幔”的
275 深部热状态特征；然而葫芦岛-凌源-绥中地区具有中等厚的岩石圈厚度，对应的居
276 里面深度值相对较小，约为20千米。综上所述，本研究区岩石圈厚度与居里面深度
277 具有复杂多样的对应关系，其成因有待进一步深入研究，这可能与区内地壳内部放
278 射性元素衰变产热及软流圈物质沿区域性断裂带上涌有关。

279 4 讨论

280 4.1 主要构造带航磁异常特征

281 由于辽宁及其邻区地表基岩出露不连续，重建本区地壳尺度的构造格架往往缺
282 乏露头依据，而磁异常特征不受地表沉积层覆盖影响，根据研究区及周边岩石物性
283 特征，航磁异常可以很好的反映和解析该地区深部磁性体和磁性基底构造样式。通
284 过对比辽宁及其邻区原始磁场异常图（图2）与化极磁场异常图（图4）可以看出，
285 化极后航磁异常对区域性断裂带与不同地质单元的构造边界勾画得更加清晰，不同
286 的磁场面貌也反映了不同构造单元基底构造的性质。在航磁 ΔT 化极磁异常图（图4）
287 中可识别出如下两组不同方向航磁异常带：

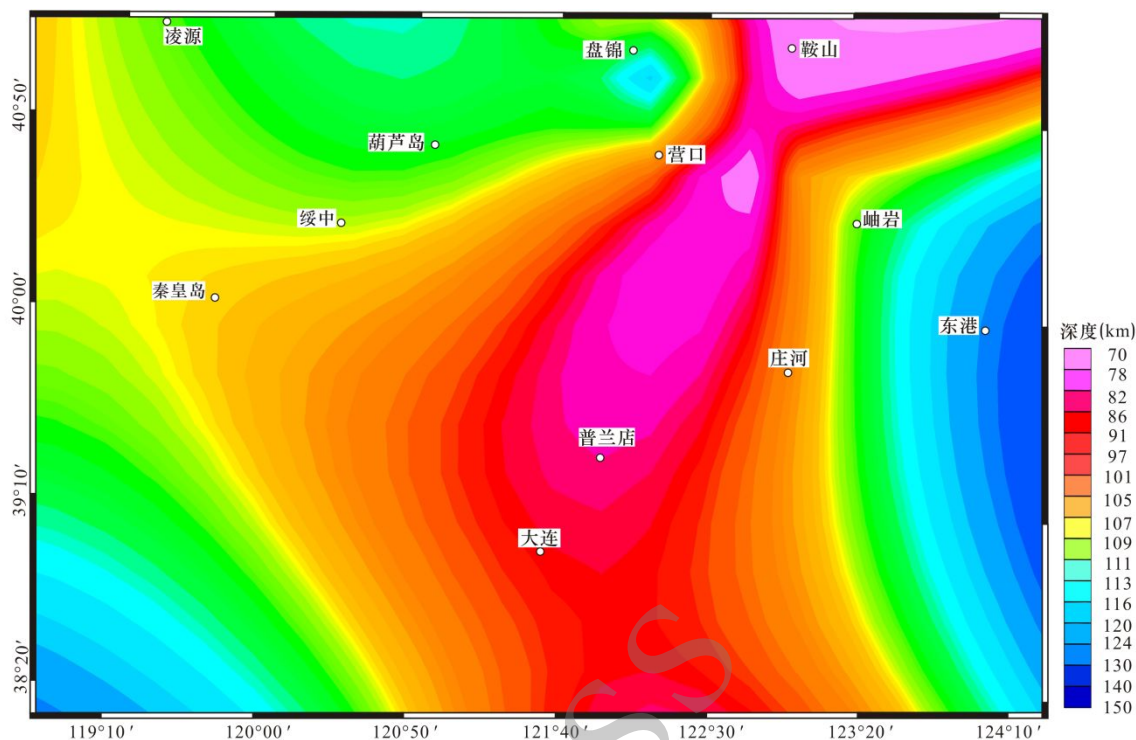


图 6 辽东半岛与渤海湾岩石圈厚度图

Fig. 6 The distribution of estimated thermal lithosphere thicknesses in Liaoning Province and its adjacent areas

(1) 北东向/北北东向航磁异常带: 如图4所示, 辽宁及其邻区分布着众多北东/北北东向航磁异常断裂带, 可识别的主要断裂带包括郯庐断裂带(中段) (F_2)、依兰-伊通断裂带 (F_3)、敦化-密山断裂带 (F_4)、鞍山-通化断裂带 (F_5)、鸭绿江断裂带 (F_6) 与凌源-朝阳断裂带 (F_7) 等, 这些断裂带相间排列、平行展布, 构成本区地壳表层构造最基本特征(辽宁省地质矿产局, 1989)。野外露头与显微构造解析表明, 这些北东/北北东向航磁异常断裂带中生代具有左行走滑, 而新生代具有右行走滑的运动学特征, 是晚中生代以来太平洋板块俯冲背景下, 活动大陆边缘长期伸展与短暂挤压状态交替演变的产物(图4; Hsiao et al., 2004; Gu et al, 2016; Liu et al., 2018, 2019a; Zhang et al., 2018; Zhu et al., 2021)。从图4中还可可见, 研究区分布着中国东部最大规模的航磁异常断裂带——郯庐断裂带, 在渤海湾至营口段该断裂带表现为一条北东向航磁异常带, 宏观上表现为磁场梯度带和线性磁异常带等的特征, 断裂带东侧为平缓升高的背景场上叠加的正异常, 西侧为正负交替背景场上叠加的强磁性正异常, 断裂带东侧连续的强磁正异常可能为龙岗地块鞍山群太古宙磁

性变质基底的直接反映。此外,如图4所示,郯庐断裂带过沈阳后分为两支,西支为依兰-伊通断裂带,东支为敦化-密山断裂带(Gu *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019a)。

(2) 北西/北西西向航磁异常带:从图4还可以看出,辽北和吉南地区除发育北东和北北东方向航磁异常带外,还发育近北西/北西西向磁异常带,在辽北法库-开原-辽源等地区最明显,该组磁异常带被北东/北北东向依兰-伊通航磁异常(断裂)和敦化-密山磁异常(断裂)带切割、错断,这些切割关系表明北西/北西西向磁异常带早于北北东/北东向异常带的形成。相关研究表明(Gu *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019a; 赵春强等, 2021; 王雷等, 2021)在华北克拉通北缘与中亚造山带之间的法库-开原-辽源一带断续出露一套晚古生代增生杂岩(简称为辽源增生杂岩),杂岩带内发育一系列北西向与北西西向韧性剪切带,剪切带内新生绿泥石、角闪石和长石构成的矿物线理优势倾向为北北东向;同构造的深熔花岗岩U-Pb年龄指示辽源增生杂岩带内北西西向韧性剪切带的形成时间于二叠纪末-三叠纪初(270~250Ma)(Gu *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019a; 王雷等, 2021)。综合以上分析可知,北西西/北西向航磁异常构造带为中亚造山带东段古亚洲洋关闭后,华北克拉通与西伯利亚克拉通碰撞造山晚期被伸展抬升至中地壳层次演变的产物(辽宁省地质矿产局, 1989; Gu *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019a; 赵春强等, 2021)。

4.2 航磁异常对华北克拉通与中亚造山带边界的制约

众所周知,在辽北-吉南地区,华北克拉通与中亚造山带的边界实际上是辽源增生杂岩带南部边界(Gu *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019a)。因敦化-密山断裂带和依兰-伊通北北东/北东向断裂带强烈左行错移了华北克拉通与辽源增生杂岩带的边界,以及晚中生代强烈的岩浆作用与第四纪地表覆盖等原因,目前学术界对华北克拉通与辽源增生杂岩带两个构造单元边界的准确位置以及被后期北东/北北东向断裂带改造后,该构造带如何向东延伸等问题,并未得到明确的解决。

综合本次辽北航磁异常特征以及最新的地表地质研究进展发现(图4; Gu *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019a),在航磁化极图(图4)中,辽源增生杂岩带在彰武、法库、开原与辽源一带延伸十分清晰,整体呈北西西向展布,同时还分布有一些华北克拉通变质基底常见的块状圈闭的强磁正异常,其南部边界为赤峰-开原断裂(F₁)。尤

333 其值得指出的是,由于在法库至彰武地区强烈的白垩纪岩浆作用与第四纪覆盖严重,
334 辽源增生杂岩穿过依兰-伊通断裂带后能否向西延伸与其准确位置并不清楚(辽宁省
335 地质矿产局, 1989),但在航磁化极异常图(图4)上,普遍显示北西西向条带状异
336 常的辽源增生杂岩带在彰武与法库地区清晰可见,它们应代表法库至彰武地区被第
337 四纪覆盖的辽源晚古生代增生杂岩。

338 从图4中还可明显看出,因依兰-伊通与敦化-密山北北东/北东向断裂带强烈的左
339 行走滑运动,导致华北克拉通与辽源增生杂岩带边界(赤峰-开原断裂带 F_1)发生了
340 明显的位移,且在不同地点,其位移量明显不同,依兰-伊通断裂带(F_3)的左行位
341 移相对较小,从化极后航磁异常图中估算可知,其位移量仅为35 km左右(图4);
342 而敦化-密山断裂带(F_4)的左行位移量则明显偏大,至少大于100 km(图略)。这
343 与前人对依兰-伊通与敦化-密山断裂带与辽源增生杂岩的构造解析、锆石年代学图
344 谱和锆石Hf同位素系统综合研究后获得的左行位移量基本一致(Gu *et al.*, 2018)。
345 从以上分析可知,辽宁及其相邻地区深部构造与浅部构造具有很好的对应关系,也
346 充分揭示了本区深部构造控制了浅部的中、新生代构造和演化。

347 4.3 居里面起伏与大地热流关系

348 众所周知,大地热流值是指单位时间内以传导或对流方式由地球内部、经地壳
349 的固体表面向外传送的热能,反映了岩石圈热状态和能量平衡,蕴含着丰富的地质、
350 地球物理和地球动力学信息,其大小与地球内部热过程、构造作用、浅部构造及地
351 壳和上地幔结构密切相关(Bouligand *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010, 2013; Bansal *et al.*,
352 2011; Wang *et al.*, 2018)。相关研究表明大地热流与居里面起伏具有较好对应关系
353 (Okubo *et al.*, 1985; 刘光夏等, 1996; Tanaka *et al.*, 1999; Lin *et al.*, 2005; Nuri *et*
354 *al.*, 2005; 姜光政等, 2016; Jiang *et al.*, 2019),如有的学者基于全球居里面深度与大
355 地热流值的相关性研究,提出了根据居里面深度可以计算大地热流值的方法
356 (Idárraga-García and Vargas, 2018)。

357 据已发表的辽宁及其邻区大地热流值可知(Jiang *et al.*, 2019),研究区大地热
358 流值总体偏高且变化范围较大,为29~104 mW/m²,均值为63.2 mW/m²,与华北克拉
359 通东部大地热流平均值十分一致(64 mW/m²; 何丽娟等, 2001; 姜光政等, 2016;

360 Jiang *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2021), 明显高于典型的稳定克拉通 ($< 50 \text{ mW/m}^2$,
361 Pollack, 1993; Li *et al.*, 2017), 这可能与该地太古宙岩石圈经受自中生代与新生代多
362 次构造热事件改造、岩石圈强烈减薄、克拉通破坏和地幔置换作用等复杂过程有关
363 (何丽娟等, 2001; Zheng *et al.*, 2021)。

364 为了进一步揭示辽宁及其邻区居里面起伏与地表热流对应关系, 我们将109个大
365 地热流值绘制在辽宁地区居里面深度图上 (图5), 其中70个数据主要集中于郯庐断
366 裂带西部的辽河盆地、辽东半岛辽河群与中生代岩浆岩带等地区 (图5; 汪集旻等,
367 1990; 胡圣标等, 2001; 姜光政等, 2016; Jiang *et al.*, 2019)。从图5可以看出, 辽宁地
368 区大地热流值与居里面起伏具有一定的相关性, 较高的热流值分布于居里面隆起的
369 盘锦、辽河盆地、辽东等地区, 如位于辽东的营口、盘锦居里面隆起区, 具有较高
370 的大地热流值, 变化于 $71 \sim 85 \text{ mW/m}^2$ 之间 (汪集旻等, 2012), 极值高达 91 mW/m^2 ,
371 这可能与该区下方软流圈上涌带来的额外热流有密切的关系 (卢造勋与夏怀宽,
372 1993; 吴福元等, 2005)。而较低的大地热流值分布于居里面的拗陷区或拗陷区边缘,
373 如辽北铁岭以南、辽南普兰店居里面拗陷区具有较低的大地热流值, 大地热流值介
374 于 $29 \sim 53 \text{ mW/m}^2$ 之间 (姜光政等, 2016)。

375 4.4 岩石圈热结构特征

376 如上所述, 本次研究获得的辽东半岛与渤海湾地区岩石圈厚度值变化范围较大,
377 变化于 $60 \sim 150 \text{ km}$ 之间 (图 6)。这一结果与前人利用其它地质-地球物理方法获得
378 的华北克拉通东部岩石圈厚度基本一致, 均显示华北克拉通东部岩石圈厚度远低于
379 北美Superior、南非Kaapvaal等典型太古宙克拉通地区 (何丽娟等, 2001; 姜光政等,
380 2016; Lee *et al.*, 2011; Furlong and Chapman, 2013; Jiang *et al.*, 2019), 它们主要包括

381 (1) 利用中-新生代火成岩中地幔包体及其所代表平衡温度与压力, Zheng *et al.*
382 (2021) 系统总结和梳理了华北克拉通的岩石圈厚度在空间上的变化特征, 包括辽宁
383 在内的华北克拉通东部地区的中-新生代火成岩所携带的地幔包体是尖晶石相大洋
384 型橄榄岩, 指示东部地区岩石圈厚度约为 $80 \sim 140 \text{ km}$, 尤其是位于区域性断裂带附
385 近甚至低于 80 km 。(2) GGT-13综合地质-地球物理剖面揭示 (卢造勋与夏怀宽,
386 1993): 在下辽河拗陷与郯庐断裂带附近存在明显的软流圈上涌, 其岩石圈厚度明

387 显变薄, 为85 ~ 95 km, 而海城至大孤山等辽东地区的岩石圈厚度相对偏厚, 变化
388 于110 ~ 125 km (卢造勋与夏怀宽, 1993)。 (3) 人工源深部地震探测结果显示,
389 华北克拉通东部岩石圈底界为75 ~ 90 km (李松林等, 2011; 王帅军等, 2014; 刘志
390 等, 2015), P波和S波接收函数限定的华北克拉通东部地区的岩石圈厚度变化于70 ~
391 110km, 仅在其西南缘达到140 km (Chen *et al.*, 2014); 面波层析成像得到的华北东
392 部岩石圈厚度为70 ~ 140 km (Huang *et al.*, 2009)。综合以上分析可知, 利用居里面深
393 度与大地热流值计算获得的辽宁及其邻区的岩石圈厚度是可靠的。

394 从图6中还可以看出, 研究区岩石圈最薄处位于辽东半岛郯庐断裂带营口至鞍山
395 地区的下方, 为60 ~ 80 km (图6), 这与Chen *et al.* (2006) 利用地震偏移成像方法
396 获得郯庐断裂带山东昌邑地区下方最薄 (60 ~ 80 km) 的岩石圈厚度一致, 共同揭
397 示了郯庐断裂带在中-新生代华北克拉通东部软流圈物质上涌和岩石圈活化过程中
398 可能起到重要作用 (Chen *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2021)。此外, 在辽东半岛丹东东
399 港及其邻区具有相对厚的岩石圈, 最厚处达150 km, 暗示丹东地区及其黄海海域下
400 方可能存在相对较厚太古宙岩石圈, 在克拉通减薄与破坏过程中改造作用不明显,
401 揭示了华北克拉通东部破坏的空间非均匀性 (Xu *et al.*, 2018; Zheng *et al.*, 2021)。

402 综合本次与前人研究表明, 华北克拉通东部岩石圈厚度变化大、小尺度横向速
403 度结构变化特征与岩石圈地幔性质都具有高度时空非均匀性 (Xu *et al.*, 2018;
404 Zheng *et al.*, 2021), 共同揭示了华北克拉通东部非均匀破坏现象, 晚中生代华北克
405 拉通岩石圈地幔被置换的优先区域往往是克拉通内部的构造薄弱带和块体边缘。结
406 合前人的研究结果 (Zheng *et al.*, 2021), 本文推测华北东部岩石圈厚度与地幔性质
407 的空间非均匀性的动力学背景可概括如下过程: 晚中生代以来, 俯冲到华北板块下
408 方的太平洋板块引起非均匀脱水作用, 造成地幔转换带顶部的地幔物质发生部分熔
409 融、触发含玄武质熔体上升流。较轻的玄武质熔体遇到稳定的克拉通岩石圈根, 在
410 岩石圈与软流圈界面发生聚集。在浮力作用下, 玄武质熔体可能通过岩石圈内部相
411 对薄弱的区域 (碰撞造山带或区域性断裂带) 继续上升。因此, 华北克拉通东部岩
412 石圈厚度与地幔性质非均匀性可能是上地幔内非均匀分布的玄武质熔体和克拉通岩
413 石圈内固有的构造薄弱带两个因素共同作用、演化的结果。

414 5 结论

415 本文在对辽宁及其邻近地区高精度航磁异常数据进行了化极处理的基础上，利
416 用功率谱法，反演计算了辽宁及其邻区居里面深度，结合本区已发表的地质-地球
417 物理资料，获得了如下初步认识：

418 (1) 辽宁及其邻区发育多条北东向/北北东向航磁异常带，是晚中生代以来太
419 平洋板片俯冲作用背景下，活动大陆边缘长期演变的产物，中生代表现为左行走滑，
420 新生代表现为右型走滑；而辽北地区被北东向磁异常带错断的北西西向航磁异常带，
421 则是古亚洲洋闭合后，中亚造山带南部边界在碰撞造山晚期伸展抬升至中地壳层次
422 的构造形迹；辽宁及其邻近地区深部构造与浅部构造具有很好的对应关系，深部构
423 造控制了本区浅部的中、新生代构造和演化。

424 (2) 辽宁及其邻区居里面深度变化于16~40 km 之间，平均深度为28 km，其
425 中，辽西隆起区居里面深度明显偏浅，最浅仅为16 km，对应较高的大地热流值；
426 辽北拗陷区沈阳、辽源等地居里面最深，深度变化范围34~40 km，对应的大地热
427 流值总体偏低。

428 (3) 辽东半岛与渤海湾地区岩石圈厚度变化较大，介于60~150 km之间，揭示
429 了华北克拉通东部破坏空间的非均匀性，其成因可能与自晚中生代以来太平洋板片
430 俯冲诱导的软流圈上升流与克拉通岩石圈内部固有的构造薄弱带的共同作用有关。

431
432 **致谢：**感谢中国地质大学（北京）姚长利教授，自然资源航空物探遥感中心黄旭钊
433 教授、范正国教授、中国科学院地质与地球物理研究所姜光政助理研究员，中国地
434 质科学院地质研究所伍家善研究员，中国地质科学院地质力学研究所王宏宇博士等
435 专家在本文撰写过程中提供的指导与帮助。

436 437 References

- 438 Bansal, A. R., Gabriel, G., Dimri, V. P., et al., 2011. Estimation of depth to the bottom of magnetic sources by a
439 modified centroid method for fractal distribution of sources: An application to aeromagnetic data in Germany.
440 *Geophysics*, 76(3): L11-L22. <http://dx.doi.org/10.1190/1.3560017>
441 Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*,
442 22(2): 359-383. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1438369>

- 1
2
3
4 443 Blakely, R. J., 1988. Curie temperature isotherm analysis and tectonic implications of aeromagnetic data from Nevada.
5 444 *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 93(B10): 11817-11832.
6 445 <http://dx.doi.org/10.1029/JB093iB10p11817>
7
8 446 Bouligand, C., Glen, J. M. G., Blakely, R. J., 2009. Mapping Curie temperature depth in the western United States with
9 447 a fractal model for crustal magnetization. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B11): 1-25.
10 448 <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006494>
11
12 449 Bureau of geology and mineral resources of Liaoning Province, 1989. Regional geology of Liaoning Province.
13 450 Geological Publishing House, Beijing, 1-856(in Chinese).
14
15 451 Chen, L., Zheng, T. Y., Xu, W. W., 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China:
16 452 Constructed from wave equation based receiver function migration. *Journal of Geophysical Research*,
17 453 111(B09312): 1-15. <http://dx.doi.org/10.1029/2008JB005977>
18
19 454 Chen, L., Cheng, C., Wei, Z. G., 2009. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness
20 455 beneath the central and western North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(1-2): 171-183.
21 456 <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2009.06.022>
22
23 457 Chen, L., Jiang, M. M., Yang, J. H., et al., 2014. Presence of an intralithospheric discontinuity in the central and
24 458 western North China Craton: Implications for destruction of the craton. *Geology*, 42(3): 223-226.
25 459 <http://dx.doi.org/10.1130/G35010.1>
26
27 460 Chi, J. S., Lu, F. X., 1996. Kimberlite and Paleozoic lithospheric mantle characteristics of the North China platform.
28 461 Science Press, Beijing, 292(in Chinese).
29
30 462 Connard, G., Couch, R., Gemperle, M., 1983. Analysis of aeromagnetic measurements from the Cascade Range in
31 463 central Oregon. *Geophysics*, 48(3): 376-390. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1441476>
32
33 464 Furlong, K. P., Chapman, D. S., 2013. Heat Flow, Heat Generation, and the Thermal State of the Lithosphere. *Annual*
34 465 *Review of Earth and Planetary Sciences*, 41: 385-410. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100051>
35
36 466 Gao, S., Rudnick, R. L., Carlson, R. W., et al., 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere the
37 467 North China craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 198(3-4): 307-322.
38 468 [http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00489-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00489-2)
39
40 469 Gao, W., Guo, Z. H., Zhou, J. X., et al., 2020. High precision aeromagnetic characteristics and Curie depth analysis of
41 470 the Hainan Island. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3246-3262(in Chinese with English abstract).
42
43 471 Gu, C. C., Zhu, G., Zhai, M. J., et al., 2016. Features and origin time of Mesozoic strike-slip structures in the
44 472 Yilan-Yitong Fault Zone. *Science China Earth Sciences*, 59(12): 2389-2410.
45 473 <http://dx.doi.org/10.1007/s11430-016-5334-4>
46
47 474 Gu, C. C., Zhu, G., Li, Y. J., et al., 2018. Timing of deformation and location of the eastern Liaoyuan Terrane, NE
48 475 China: Constraints on the final closure time of the Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Research*, 60: 194-212.
49 476 <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2018.04.012>
50
51 477 Guo, Z. H., Yu, C. C., Zhou, J. X., 2003. The tangent technique of ΔT profile magnetic anomaly in the low magnetic
52 478 latitude area. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 27(5): 391-394(in Chinese with English abstract).
53
54
55
56
57
58
59
60

- 1
2
3
4 479 He, L. J., Hu, S. B., Wang, J. Y., 2001. Thermal structure characteristics of lithosphere in eastern Continental China.
5 480 *Progress in natural Science*, 11(9): 966-969(in Chinese).
- 6
7 481 Hou, Z. C., Li, B. G., 1985. Power spectrum methods for direct estimating the depth to the bottom of magnetic source.
8 482 *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 7(3): 179-187(in Chinese with English
9 483 abstract).
- 10
11 484 Hsiao, L. Y., Graham, S. A., Tilander, N. 2004. Seismic reflection imaging of a major strike-slip fault zone in a rift
12 485 system: Paleogene structure and evolution of the Tan-Lu fault system, Liaodong Bay, Bohai, offshore China.
13 486 *Advancing the World of Petroleum Geosciences Bulletin*, 88(1):71-97. <http://dx.doi.org/10.1306/09090302019>
- 14
15 487 Hu, S. B., He, L. J., Wang, J. Y., 2001. Compilation of heat flow data in the China continental area(3rd edition).
16 488 *Chinese Journal of Geophysics*, 44(5): 142-157(in Chinese with English abstract).
- 17
18 489 Huang, F., He, L. J., Wu, Q. J., 2015. Lithospheric thermal structure of the Ordos Basin and its implications to
19 490 destruction of the North China Craton. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(10): 3671-3686(in Chinese with
20 491 English abstract).
- 21
22 492 Huang, Z. X., Li, H. Y., Zheng, Y. J., et al., 2009. The lithosphere of North China Craton from surface wave
23 493 tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 288: 164-173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.019>
- 24
25 494 Idárraga-García, J., Vargas, C. A., 2018. Depth to the bottom of magnetic layer in South America and its relationship to
26 495 Curie isotherm, Moho depth and seismicity behavior. *Geodesy and Geodynamics*, 9(1): 93-107.
27 496 <http://dx.doi.org/10.1016/j.geog.2017.09.006>
- 28
29 497 Jiang, G. Z., Gao, P., Rao, S., et al., 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition).
30 498 *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2892-2910(in Chinese with English abstract).
- 31
32 499 Jiang, G. Z., Hu, S. B., Shi, Y. Z., et al., 2019. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic
33 500 implications. *Tectonophysics*, 753: 36-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2019.01.006>
- 34
35 501 Jiang, W. W., Guan, Z. N., Hao, T. Y., et al., 2002. Characters of Geophysical fields and forecasting of metal mine at
36 502 the North edge of Huabei Platform. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(2): 233-245(in Chinese with English
37 503 abstract).
- 38
39 504 Lachenbruch, A. H., 1978. Heat Flow in the Basin and Range province and thermal effects of tectonic extension. *Pure
40 505 and Applied Geophysics*, 117: 34-50. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00879732>
- 41
42 506 Lee, C. A., Luffi, P., Chin, E. J., 2011. Building and Destroying Continental Mantle. *Annual Review of Earth and
43 507 Planetary Sciences*, 39: 59-90. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-earth-040610-133505>
- 44
45 508 Li, C. F., Shi, X. B., Zhou, Z.Y., et al., 2010. Depths to the magnetic layer bottom in the South China Sea area and
46 509 their tectonic implications. *Geophysical Journal International*, 182(3): 1229-1247.
47 510 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04702.x>
- 48
49 511 Li, C. F., Wang, J., Zhou, Z., et al., 2012. 3D geophysical characterization of the Sulu-Dabie orogen and its environs.
50 512 *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 192-193: 35-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2012.01.003>
- 51
52 513 Li, C. F., Wang, J., Lin, J., et al., 2013. Thermal evolution of the North Atlantic lithosphere: New constraints from
53 514 magnetic anomaly inversion with a fractal magnetization model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(12):

- 515 5078-5105. <http://dx.doi.org/10.1002/2013GC004896>
- 516 Li, C. F., Lu, Y., Wang, J., 2017. A global reference model of Curie-point depths based on EMAG2. *Scientific Reports*,
517 7: 45129. <http://dx.doi.org/10.1038/srep45129>
- 518 Li, S. Z., Zhao, G. C., Min, S., et al., 2005. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohe assemblage in the
519 eastern block of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 659-674. [http://dx.doi.org/](http://dx.doi.org/10.1016/j.jseae.2003.11.008)
520 10.1016/j.jseae.2003.11.008
- 521 Li, S. Z., Zhao, G. C., 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution
522 of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton. *Precambrian Research*,
523 158(1-2): 1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.001>
- 524 Li, S. L., Miao, Q., Wang, X., 2011. Low velocity layers of the crust in North China. *Journal of geodesy and*
525 *geodynamics*, 31(5): 35-38+60(in Chinese with English abstract).
- 526 Lin, W., Zeng, J. P., Meng, L. T., et al., 2021. Extensional tectonics and North China Craton destruction: Insights from
527 the magnetic susceptibility anisotropy (AMS) of granite and metamorphic core complex. *Science China Earth*
528 *Sciences*, 64(9): 1557-1589. <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9754-1>
- 529 Lin, J. Y., Sibuet, J. C., Hsu, S. K., 2005. Distribution of the East China Sea continental shelf basins and depths of
530 magnetic sources. *Earth Planets Space*, 57: 1063-1072. <https://doi.org/10.1186/BF03351885>
- 531 Liu, C., Zhu, G., Zhang, S., et al., 2018. Mesozoic strike-slip movement of the Dunhua-Mishan Fault Zone in NE China:
532 A response to oceanic plate subduction. *Tectonophysics*, 723: 201-222. [http://dx.doi.org/](http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.12.024)
533 10.1016/j.tecto.2017.12.024
- 534 Liu, C., Zhu, G., Xie, C. L., et al., 2019a. Location and sinistral displacement of the eastern Liaoyuan Accretionary Belt
535 along the Tan-Lu Fault Zone, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 172: 409-422.
536 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseae.2018.10.002>
- 537 Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the
538 Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339.
539 [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0339:ROMCIT>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0339:ROMCIT>2.3.CO;2)
- 540 Liu, P. H., Liu, F. L., Tian, Z. H., et al., 2019b. Petrological and geochronological evidence for Paleoproterozoic
541 granulite-facies metamorphism of the South Liaohe Group in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton.
542 *Precambrian Research*, 327: 121-143. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.03.002>
- 543 Liu, P. H., Tian, Z. H., Wen, F., et al., 2020. Multiple High-Grade Metamorphic Events of the Jiaobei Terrane, North
544 China Craton: New Evidences from Zircon U-Pb Ages and Trace Elements Compositions of Garnet Amphibole
545 and Granitic Leucosomes. *Earth Science*, 45(9):3196-3216 (in Chinese with English abstract).
- 546 Liu, G. X., Zhang, X., He, W. M., et al., 1996. Research on curie Iso-geothermal surface in Bohai Sea and its adjacent
547 region. *Seismology and Geology*, 18(4): 398-402 (in Chinese with English abstract).
- 548 Liu, T. Y., Zhu, W. X., Fang, X. M., 1987. An inversion method of the continual model on curie surface. *Earth*
549 *Science-Journal of Wuhan College of Geology*, 12(6): 647-656 (in Chinese with English abstract).
- 550 Liu, Z., Wang, F. Y., Zhang, X. K., et al., 2015. Seismic structure of the lithosphere beneath Eastern North China

- 1
2
3
4 551 craton: results from long distance deep seismic sounding. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(4): 1145-1157(in
5 552 Chinese with English abstract).
- 6
7 553 Lu, Z. X., Xia, H. K., 1993. Geoscience transect from Dong Ujimqinqi, Nei Mongol, to Dongguo, Liaoning, China.
8 554 *Chinese Journal of Geophysics*, 36(6): 765-772(in Chinese with English abstract).
- 9
10 555 Meng, X. J., Liu, Z., Zhang, S., et al., 2016. Petrophysical properties of rocks surrounding the Liaodong Bay. *Marine*
11 556 *Geology Frontiers*, 32(5): 1-7(in Chinese with English abstract).
- 12
13 557 Nuri, D. M., Ustaömer, T., Hisarli, M. Z., et al., 2005. Curie Point Depth variations to infer thermal structure of the
14 558 crust at the African-Eurasian convergence zone, SW Turkey. *Earth Planets Space*, 57: 373-383.
15 559 <http://dx.doi.org/10.1186/BF03351821>
- 16
17 560 Okubo, Y., Graf, R. J., Ogawa, K. H., et al., 1985. Curie point depths of the Island of Kyushu and surrounding areas,
18 561 Japan. *Geophysics*, 50(3): 481-494. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1441926>
- 19
20 562 Pollack, H. N., Hurter, S. J., Johnson, J. R., 1993. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set.
21 563 *Review of Geophysics*, 31(3): 267-280. <http://dx.doi.org/10.1029/93RG01249>
- 22
23 564 Ravat, D., Pignatelli, A., Nicolosi, I., et al., 2007. A study of spectral methods of estimating the depth to the bottom of
24 565 magnetic sources from near-surface magnetic anomaly data. *Geophysical Journal International*, 169(2): 421-434.
25 566 <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03305.x>
- 26
27 567 Shuey, R. T., Schellinger, D. K., Tripp, A. C., et al., 1977. Curie depth determination from aeromagnetic spectra.
28 568 *Geophysical Journal International*, 50(1): 75-101. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1977.tb01325.x>
- 29
30 569 Spector, A., Grant, F. S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2): 293-302.
31 570 <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440092>
- 32
33 571 Tanaka, A., Okubo, Y., Matsubayashi, O., 1999. Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly
34 572 data in East and Southeast Asia. *Tectonophysics*, 306(3-4): 461-470.
35 573 [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00072-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00072-4)
- 36
37 574 Thébault, E., Christopher, C., Ciaran, D., et al., 2015. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation.
38 575 *Earth, Planets and Space*, 67-79: 1-19. <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>
- 39
40 576 Turcotte, D. L., Schubert, G., 2002. Geodynamics. Cambridge University Press, 73-104.
- 41
42 577 Wang, J., Li, C. F., 2015. Crustal magmatism and lithospheric geothermal state of western North America and their
43 578 implications for a magnetic mantle. *Tectonophysics*, 638: 112-125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.11.002>
- 44
45 579 Wang, J., Li, C. F., 2018. Curie point depths in Northeast China and their geothermal implications for the Songliao
46 580 Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 163: 177-193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2018.05.026>
- 47
48 581 Wang, J. Y., Huang, S. P., 1990. Compilation of heat flow data in China continental area (2nd edition). *Seismology and*
49 582 *Geology*, 12(4): 351-366(in Chinese with English abstract).
- 50
51 583 Wang, J. Y., Hu, S. B., Pang, Z. H., et al., 2012. Estimate of Geothermal Resources Potential for Hot Dry Rock in the
52 584 Continental Area of China. *Tech Review*, 30(32): 25-31(in Chinese with English abstract).
- 53
54 585 Wang, S. J., Wang, F. Y., Zhang, J. S., et al., 2014. The P-wave velocity structure of the lithosphere of the North China
55 586 Craton-Results from the Wendeng-Alxa Left Banner deep seismic sounding profile. *Science China: Earth*

- 1
2
3
4 587 *Sciences*, 57: 2053-2063(in Chinese).
- 5 588 Wang, W., Liu, S. W., Santosh, M., 2015. Neoproterozoic intra-oceanic arc system in the Western Liaoning Province:
6 589 Implications for Early Precambrian crustal evolution in the Eastern Block of the North China Craton.
7 590 *Earth-Science Reviews*, 150: 329-364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.08.002>
- 8 591 Wu, F. Y., Yang, J. H., Liu, X. M., 2005. Geochronological Framework of the Mesozoic Granitic Magmatism in the
9 592 Liaodong Peninsula, Northeast China. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 305-317(in Chinese with
10 593 English abstract).
- 11 594 Wu, F. Y., Xu, Y. G., Zhu, R. X., et al., 2014. Thinning and destruction of the cratonic lithosphere: A global
12 595 perspective. *Science China: Earth Sciences*, 57: 2878-2890. <https://doi.org/10.1007/s11430-014-4995-0>
- 13 596 Wu, F. Y., Yang, J. H., Xu, Y. G., et al., 2018. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. *Annual Review*
14 597 *of Earth and Planetary Sciences*, 47(1): 173-195. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060342>
- 15 598 Xu, X. B., Zhao, L., Wang, K., et al., 2018. Indication from finite-frequency tomography beneath the North China
16 599 Craton: The heterogeneity of craton destruction. *Science China Earth Sciences*, 61(9):
17 600 1238-1260. <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9201-y>
- 18 601 Zhai, M. G., Santosh, M., Zhang, L., 2011. Precambrian geology and tectonic evolution of the North China Craton.
19 602 *Gondwana Research*, 20(1): 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.04.004>
- 20 603 Zhai, M. G., Santosh, M., 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving
21 604 Earth. *Gondwana Research*, 24(1): 275 - 297. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2013.02.007>
- 22 605 Zhang, S., Zhu, G., Liu, C., et al., 2018. Strike-slip motion within the Yalu River Fault Zone, NE Asia: The
23 606 development of a shear continental margin. *Tectonics*, 37: 1771-1796. <http://dx.doi.org/10.1029/2018TC004968>
- 24 607 Zhang, Y.J., Liu, P. H., Zhou, W.P., et al., 2022. Detrital zircon U-Pb dating of arkose-quartzite in the Lugezhuang
25 608 Formation in the Jingqishan area, Jiaobei terrane, and its geological significance. *Earth Science*, (in Chinese with
26 609 English abstract).
- 27 610 Zhao, C. Q., Zhang, Z. B., Shi, Y., et al., 2021. The deformation and metamorphic features of Faku metamorphic
28 611 complex the composition and tectonic affinity in the northern Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 37(7):
29 612 1983-2006 (in Chinese with English abstract).
- 30 613 Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Achaean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton:
31 614 key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177-202. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.002>
- 32 615 Zhao, G. C., Cawood, P. A., Li, S. Z., et al., 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion.
33 616 *Precambrian Research*, 222-223: 55-76. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.016>
- 34 617 Zheng, J. P., Xia, B., Ping, X. Q., et al., 2021. Rock probes and seismic methods to constrain the structure, composition
35 618 and evolution of the deep crust beneath North China Block. *Chinese Science Bulletin*, 66(23):
36 619 3018-3031. <https://doi.org/10.1360/TB-2020-1204>
- 37 620 Zheng, Y. F., Xu, Z., Zhao, Z. F., et al., 2018. Mesozoic mafic magmatism in North China: Implications for thinning
38 621 and destruction of cratonic lithosphere. *Science China Earth Sciences*, 61: 353-385. .
39 622 <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9160-3>

- 623 Zhou, L. H., Li, S. Z., Zhao, G. C., et al., 2004. Gravity and magnetic features of crystalline basement in the central and
624 Eastern North China Craton. *Progress in Geophysics*, 19(1): 91-100 (in Chinese with English abstract).
- 625 Zhu, G., Liu, C., Gu, C. C., et al., 2018. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: Constraint from
626 late Mesozoic evolution of the Tan-Lu Fault Zone. *Science China Earth Sciences*, 61: 386-405.
627 <http://doi.org/10.1007/s11430-017-9136-4>
- 628 Zhu, R. X., Xu, Y. G., 2019. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton.
629 *Science China Earth Sciences*, 62(9): 1340-1350. <http://dx.doi.org/10.1007/s11430-018-9356-y>
- 630 Zhu, R. X., Sun, W. D., 2021. The big mantle wedge and decratonic gold deposits. *Science China Earth Sciences*, 64(9):
631 1451-1462. <http://dx.doi.org/10.1007/s11430-020-9733-1>

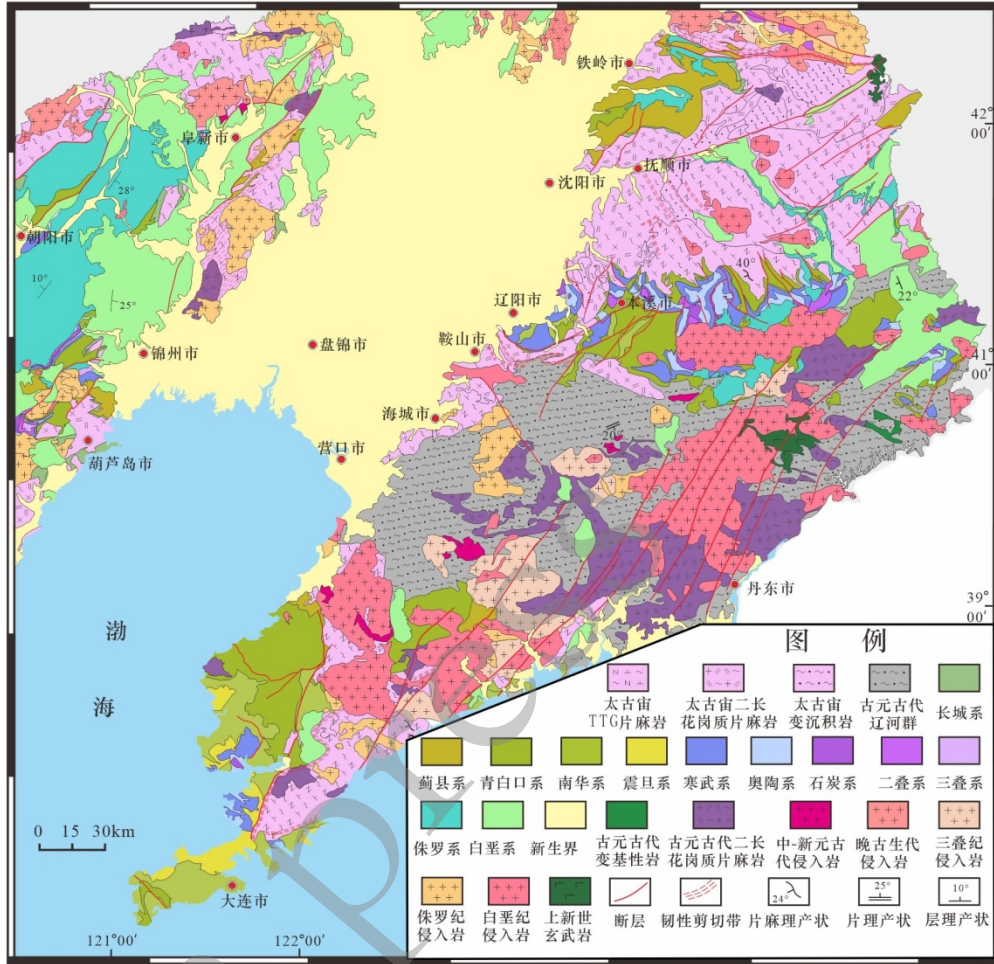
632

633

634 附中文参考文献

- 635 池际尚, 路凤香. 1996. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社, 292.
- 636 高维, 郭志宏, 周坚鑫, 等. 2020. 海南岛高精度航磁特征与居里面深度分析. *地质学报*, 94(11): 3249-3262.
- 637 郭志宏, 于长春, 周坚鑫, 2003. 低磁纬度区 ΔT 剖面磁异常场源深度计算的切线法. *物探与化探*, 27(5): 391-394.
- 638 何丽娟, 胡圣标, 汪集昉, 2001. 中国东部大陆地区岩石圈热结构特征. *自然科学进展*, 11(9): 966-969.
- 639 侯重初, 李保国, 1985. 直接计算磁性下界面深度的功率谱法. *物化探计算技术*, 7(3): 179-187.
- 640 胡圣标, 何丽娟, 汪集昉, 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版). *地球物理学报*, 44(5): 142-157.
- 641 黄方, 何丽娟, 吴庆举, 2015. 鄂尔多斯盆地深部热结构特征及其对华北克拉通破坏的启示. *地球物理学报*,
642 58(10): 3671-3686.
- 643 江为为, 管志宁, 郝天珧, 等, 2002. 华北地台北缘地球物理场特征与金属矿床预测. *地球物理学报*, 45(2):
644 233-245.
- 645 姜光政, 高棚, 饶松, 等, 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版). *地球物理学报*, 59(8): 2892-2910.
- 646 李松林, 苗琪, 王旭, 2011. 华北地区的地壳低速层. *大地测量与地球动力学*, 31(5): 35-38, 60.
- 647 辽宁省地质矿产局, 1989. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-856.
- 648 刘光夏, 张先, 贺为民, 等, 1996. 渤海及其邻区居里面的研究. *地震地质*, 18(4): 398-402.
- 649 刘平华, 田忠华, 文飞, 等, 2020. 华北克拉通胶北地体多期高级变质事件: 来自石榴斜长角闪岩与花岗质浅色体
650 锆石U-Pb定年与稀土元素的新证据. *地球科学*, 45(9): 3196-3216.
- 651 刘天佑, 朱文孝, 方晓梅, 1987. 一种连续模型的居里面反演方法. *地球科学-武汉地质学院学报*, 12(6): 647-656.
- 652 刘志, 王夫运, 张先康, 等. 2015. 华北克拉通东部地壳与地幔盖层结构——长观测距深地震测深剖面结果. *地
653 球物理学报*, 58(4): 1145-1157.
- 654 卢造勋, 夏怀宽, 1993. 内蒙古东乌珠穆沁旗——辽宁东沟地学断面. *地球物理学报*, 36(6): 765-772.
- 655 孟祥君, 刘展, 张松, 等, 2016. 辽东湾沿岸岩石物性特征. *海洋地质前沿*, 32(5): 1-7.
- 656 汪集昉, 黄少鹏, 1990. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版). *地震地质*, 12(4): 351-366.
- 657 汪集昉, 胡圣标, 庞忠和, 等, 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估. *科技导报*, 30(32): 25-31.
- 658 王帅军, 王夫运, 张建狮, 等, 2014. 华北克拉通岩石圈二维P波速度结构特征——文登-阿拉善左旗深地震测深

- 1
2
3
4 659 剖面结果. 中国科学: 地球科学, 44(12): 2697-2708.
- 5 660 吴福元, 杨进辉, 柳小明, 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. 高校地质学报, 11(3): 305-317.
- 6 661 张宇佳, 刘平华, 周万蓬, 王义龙, 王宏宇. 胶北旌旗山地区禄格庄岩组长石石英岩碎屑锆石 U-Pb 测年及
7 662 其地质意义 [J/OL]. 地球科学.
- 8 663 赵春强, 张志斌, 时溢, 等, 2021. 辽北法库变质杂岩的组成、变形与变质特点及构造属性. 岩石学报, 37(7):
9 664 1983-2006.
- 10 665 周立宏, 李三忠, 赵国春, 等, 2004. 华北克拉通中东部基底构造单元的重磁特征. 地球物理学进展, 19(1):
11 666 91-100.
- 12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60



159x154mm (300 x 300 DPI)