

文章编号: 1000-4734(2023)04-0533-14

多项式趋势面分析在磷块岩深部勘探中应用： 以瓮福磷矿英坪矿段为例

罗俊峰¹, 周光红^{2*}, 苏之良¹, 文瑞成³, 蔡健龙³, 欧义³, 罗泰义⁴

(1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局 地质矿产勘查院, 贵州 贵阳 550005; 2. 贵州师范学院 地理与资源学院, 贵州 贵阳 550018; 3. 瓮福(集团)有限责任公司, 贵州 福泉 550509; 4. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 磷块岩是重要的磷矿资源, 主要发育于大陆边缘的台地相, 在一定空间范围内磷块岩厚度具有稳定而缓慢变化的特点, 多项式趋势面分析方法非常适于刻画这种空间演化特征。本次研究收集了瓮福磷矿田高坪矿区英坪矿段 B 矿层未经历后期断层破坏或抬升剥蚀的 88 项勘探工程资料, 以 B 矿层厚度为因变量, 以工程的地理坐标为自变量, 开展 1~5 次多项式趋势面分析方法在沉积磷矿床深部勘探的示范性研究。获得如下主要认识: 1) 坐标选择: 根据勘探范围的空间尺度, 通过坐标平移进行坐标简化, 能更加突出因变量的空间演化特征; 2) 数据变换: 因变量的数据变换对变量之间的相关程度没有影响, 自变量的等比例缩放不影响变量之间的相关程度, 但极差正规化和极差标准化对变量之间的相关程度有微弱影响; 3) 最优趋势面判定及异常特征: 以 B 矿层厚度等值线图为基础, 结合趋势面的拟合度和 F 检验值的转折变化, 判定 3 次多项式趋势面为最优趋势面(拟合度为 77.39%, F 检验值 = $39.11 > F_{0.001}(7, 87) \approx 3.94$), 相应 B 矿层厚度的正异常主要集中在英坪矿段的中部东侧; 4) 古地貌特征: 最优趋势面趋势值的负值表征了晚陡山沱期英坪矿段为从西缘瓮福古岛向东逐渐变深的潟湖, 北侧和南侧分别为谭家院水下高地和湾子半岛, 远东方向可能受上塘—青平障壁岛限制; 5) 找矿预测: 根据已有的岩相古地理研究成果和勘探工程资料, 结合最优多项式趋势面特征, 综合预测英坪矿段东侧具有寻找厚大 B 矿层磷块岩的较大潜力。研究表明, 基于多项式趋势面分析在磷块岩矿床深部勘探中结果可靠, 具有重要应用价值。

关键词: 多项式趋势面分析; 深部勘探; 磷块岩; 英坪矿段; 瓮福磷矿

中图分类号: P612

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.041

第一作者: 罗俊峰, 男, 1985 年生, 高级工程师, 从事地质找矿工作。E-mail: 363964899@qq.com

Application of polynomial trend surface analysis in the exploration of phosphorite in depth: Taking the Yingping oreblock of Wengfu deposit as an example

LUO Jun-feng¹, ZHOU Guang-hong^{2*}, SU Zhi-liang¹, WEN Rui-cheng³, CAI Jian-long³, OU Yi³, LUO Tai-yi⁴

(1. Institute of Geology and Mineral Exploration, Guizhou Bureau of Non-ferrous Metals and Nuclear Industry, Guiyang 550005, China;

2. School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China;

3. Wengfu (Group) Co., Ltd., Fuquan 550509, China;

4. The State Key Laboratory of Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: Phosphorite is an important phosphate ore resource, and is mainly developed in the platform facies of continental margin. The thickness of phosphorite is stable and slowly changing in a certain spatial range. Therefore, the polynomial trend surface analysis method is very suitable to describe this spatial evolution characteristics. In this study,

收稿日期: 2023-03-28

基金项目: 贵州师范学院国家科技部和国家自然科学基金项目奖励补助资金项目(编号: 黔科合平台人才[2018]5778-04); 国家自然科学基金项目(编号: 41802027; U1812402); 贵州省高等学校数字乡村创新团队(编号: 黔教技[2023]076号)

* 通讯作者, E-mail: zhouguanghong@gznc.edu.cn

data of 88 items associated with the B ore layer, which were not obviously disturbed by faults or uplift denudation, were collected from exploration projects of the Yingping oreblock Gaoping Mining area, Wengfu Phosphate Mine. Taking the thickness of the B ore layer as a dependent variable and the geographical coordinates of the exploration projects as independent variables, a demonstration study on the 1-5 orders polynomial trend surface analysis method applied in the exploration of sedimentary phosphate deposit in depth has been carried out. The main following results and understandings are obtained. 1) Coordinate selection: Based on the spatial scale of exploration area, the coordinate simplification through the coordinate translation can highlight the spatial evolution characteristics of dependent variables; 2) Data transversion: The data transversion of dependent variable and the proportional scaling of independent variable have no effect on the degree of correlation between variables, but the range normalization and range standardization have weak effect on the correlation between variables; 3) Optimal trend surface discrimination and anomaly characteristics: Based on the contour map of B ore layer thickness, combined with the collaborative changes of goodness-of-fit and F -test value of the trend surface, the 3 order polynomial trend surface is determined to be the optimal trend surface (with the goodness-of-fit of 77.39% and F -test value (F) of 39.11 which is larger than $F_{0.001}(7, 87)$ (about 3.94)), and the positive anomalies of the B ore layer thickness are mainly concentrated in the eastern central part of the Yingping oreblock. 4) Palaeogeomorphic characteristics: The contour map of negative value of the optimal trend surface indicates that the Yingping oreblock of the Late Doushantuo period is a lagoon gradually deepening eastward from the Wengfu Island in the western margin, the Tanjiayuan underwater highland and Wanzi Peninsula in the north and south sides, respectively, and may be restricted by the Shangtang-Qingping barrier island in the far-east side; 5) Exploration prediction: Based on the previous research results of lithofacies palaeogeography and exploration projects, combined with characteristics of the optimal polynomial trend surface, it is comprehensively predicted that the east side of the Yingping oreblock has great potential to find thick and large B phosphorite ore layer. The results show that the polynomial trend surface analysis is reliable in the exploration of the deep part of phosphorite deposit and is of important application value.

Keywords: polynomial trend surface analysis; exploration in depth; phosphorite; Yingping oreblock; Wengfu phosphorite deposit

磷是地球生命的基本组成元素，被称为生长制约性营养元素（growth limiting nutrient）^[1-2]。磷矿资源具有不可替代性、不可再生性和不可二次利用的特征，是关系人类生存和稳定发展的关键资源^[3]。截止到 2020 年，我国磷矿的查明资源量约为 265 亿 t，主要为沉积成因磷块岩。从 2011—2020 年我国共开采磷矿矿石 10.84 亿 t，平均每年开采 1.08 亿 t^[4-5]。2021 年我国磷矿矿石的储量为 19.13 亿 t^[6]，按照近十年的平均开采速率，储采比为 17.7，可供经济开采的磷矿储量保障年限约为 18 年。根据多种模式进行的预测表明，我国磷肥的消费峰期为 2020—2025 年，磷矿石消费量将达 2000~2100 万 t/年（折 P_2O_5 100%），峰值后磷矿石消费量将缓慢下降^[4]。另一方面，由于新能源产业的兴起，磷酸锰铁锂材料的需求方兴未艾，有可能进一步提升我国的磷矿石消费。由于大部分浅表露天矿山开采殆尽，我国磷矿勘探已经转向深部，亟需加强对深部隐伏磷矿资源的预测研究。

趋势是指事物发展的总趋向，它不受局部因素的影响而由总的规律所支配。趋势面分析就是对一组数据中包含的区域性（趋势分量）、局部性（局部分量）和随机性（随机分量）信息进行解析，排除随机干扰，确定区域性演化规律，突出局部异常，多项式趋势面分析已经被广泛应用于石油和天然气的勘探预测^[7-8]。沉积磷块岩的厚度在台地相区内变化缓慢，具有一定的区域稳定性，通过多项式趋势面分析可能对磷块岩厚度的空间展布规律进行解析，如昆阳磷矿露天采场的矿层顶板标高和矿层厚度均可用一次趋势面拟合，反映了磷块岩矿层结构的稳定性^[9]。尽管沉积磷块岩的成矿规律预期了多项式趋势面分析能有效拟合一定区域内磷矿层厚度的展布特征，但该方法在磷块岩矿床深部勘探中的应用还几乎为空白。贵州是我国重要的磷化工基地，重要成磷层位包括陡山沱组和寒武系牛蹄塘组，其中开阳—瓮安—福泉是陡山沱期磷矿集区。在近年的深部找矿中，开阳地区新增富磷矿资源 3.6 亿 t^[10]，

暗示了该地区依然具有优越的找矿潜力。瓮福磷矿南部的英坪矿段是高坪矿区成矿条件最好、储量最大的矿段,积累了丰富的勘探工程资料,本次研究的目的是以英坪矿段作为示范,通过对该矿段B矿层磷块岩厚度的多项式趋势面分析,结合已有的勘采资料,探索多项式趋势面分析方法在磷块岩深部找矿预测中的应用。

1 地质背景

1.1 瓮福磷矿地质概况

瓮福磷矿位于扬子陆块南部被动边缘褶冲带,属于上扬子陆块黔北隆起区凤冈南北向隔槽式褶皱变形区,与江南复合造山带黔南拗陷区都匀南北向隔槽式褶皱变形区和铜仁复式褶皱变形区等2个四级构造单元紧邻。矿区所处最小构造地质单元为白岩—高坪背斜,背斜总体呈北北东向展布,处于瓮安向斜与平寨向斜之间。受近南北向小坝断层的错动,该背斜进一步划分为北部的白岩背斜和南部的高坪背斜,二者均为西缓东陡的斜歪倾伏褶曲。主要断裂带包括穿岩洞—新桥—桅杆坪逆冲断裂带和小坝断裂。前者由3~5条南北向逆冲断层组成,主要发育于新桥—桅杆坪一带,宽150~200 m,由主断裂与派生的断裂组成构造带;后者是延伸达25 km的断裂,总体走向近南北,断面总体东倾,倾角 $52^{\circ}\sim 86^{\circ}$,局部倒转^[11]。

区内最老地层为青白口系,出露于白岩—高坪背斜核部,背斜两翼由老至新依次分布南华系、震旦系、寒武系、二叠系及三叠系地层,缺失奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系地层。成磷岩系主要包括寒武系纽芬兰统牛蹄塘组和震旦系下统陡山沱组。牛蹄塘组底部磷矿被称为“上磷矿”,在矿区范围内因厚度薄而不具有工业意义。陡山沱组所产磷矿被称为“下磷矿”,在矿区范围内从下至上分为A、B两层矿,为主要工业矿体。瓮福磷矿矿区内陡山沱组由A、B层磷块岩与3层含磷白云岩、硅质白云岩(顶板、夹层、底板白云岩)组成,厚度较为稳定,大致具有北厚南薄的特点^[12]。

瓮福磷矿自上世纪50年代发现至今,贵州省多家地勘单位先后开展了不同程度的勘查工作,将白岩—高坪背斜含磷矿层分为白岩矿区和高坪矿区,从北到南划分为9个矿段,包括北部白岩矿区的玉华、王家院、大塘、穿岩洞、新桥等5个矿段和南部高坪矿区的磨坊、大寨、英坪及小坝等4个矿段(图1)。在大塘、穿岩洞、王家院及新桥等4个矿段内A、B矿层均具工业意义;其它五个矿段只有B矿层具工业价值。B矿层除局部沉积尖灭外,在全区发育良好,走向延伸长达17.5 km,具有厚度大和品位较高的优点^[11]。

1.2 英坪矿段地质概况

英坪矿段位于高坪矿区的南东段,南北长约6.4 km,东西宽1~3 km,矿段面积约9 km²,包括英坪磷矿、英坪深部磷矿和大荒田磷矿3个矿床(图1)。英坪磷矿于1981年完成详细勘查,共探明B+C+D级磷矿石储量约11000万t,包括近3970万t的露采储量,伴生C+D级碘储量约6900 t^[13]。英坪深部磷矿位于英坪磷矿东部,于2018年完成勘探工作(包含了英坪磷矿1981年详勘的部分钻孔),在1981年详勘的基础上新增331+332+333级磷矿石储量约7500万t^[15]。大荒田磷矿是一个小型矿床,采用的勘探资料基本来自于1981年英坪磷矿的详细勘查,因此本文不予单独讨论。

英坪矿段内出露的地层有青白口系清水江组,南华系南沱组,震旦系陡山沱组、灯影组,寒武系牛蹄塘组、明心寺组、金顶山组,以及第四系。具工业意义的含磷岩系为陡山沱组,科研工作中陡山沱组自下而上划分为5个岩性段^[16],但在英坪矿段的勘探工作中简化为4个岩性段(第五岩性段划入灯影组)^[13,15],由老至新包括:

陡山沱组第 1、2 段 (Pt₃³d¹⁻²): 浅灰、肉红色中厚层泥晶细晶白云岩, 夹硅质白云岩, 底部常为含砾白云岩, 顶部偶见透镜状薄层砂屑磷块岩 (A 矿层)。厚 1.57~24.86 m。

陡山沱组第 3 段 (Pt₃³d³): 为乳白色厚层块状硅质岩, 层理不清, 下部常夹白云岩团块, 中部质纯, 上部普遍含形状不一、大小不等的黑色致密磷块岩团块或条带, 顶界与 Pt₃³d⁴ 接触面凹凸不平。厚 7.51~39.70 m。

陡山沱组第 4 段 (Pt₃³d⁴): B 矿层, 由薄层至厚层白云质磷块岩、致密状、团块状、条带状及砂砾状磷块岩组成, 有时为含磷块岩团块硅质岩。厚 1.75~38.45 m。

对英坪矿段影响较大的构造主要为断裂, 发育于矿段北部和北东部。I号矿体位于 F₁₀₄ 下盘内, II号矿体位于 F₁₀₄ 上盘—F₁ 下盘内, 其中II号矿体为主矿体。破矿断层为 F₁₀₂, 但在矿区内断层重复带规模小, 两盘矿体位移不大, 总体构造复杂程度为简单。

B 矿层在英坪矿段内主要分布于 7~10⁺²⁰⁰ 线之间, 在剖面上为层状、似层状产出, 呈单斜构造、产状稳定, 矿层产状与地层产状一致, 平均倾角 37°。矿体内偶见含磷白云岩、含磷硅质岩夹石 1~2 层 (大部分厚度小于 1.5 m), 未见无矿天窗, 矿体形态完整、连续性好, 内部结构简单。根据参与 2018 年勘探资源量计算的 43 个探矿工程统计, B 矿层厚度 1.75~38.45 m, 平均厚 18.48 m, 厚度变化系数为 49.14%, 属较稳定型。其中规模最大的 II 号矿体 (331+332+333 资源量约 1 亿 t) 的 B 矿层沿走向 (近南北向) 具有中部厚度大而稳定, 向南北两端逐渐自然尖灭或遇破矿断层错错落空的特点 (图 2a), 沿倾向 (以 2 号勘探线为例) 具有从西向东逐渐增厚的特点 (图 2b) [15]。

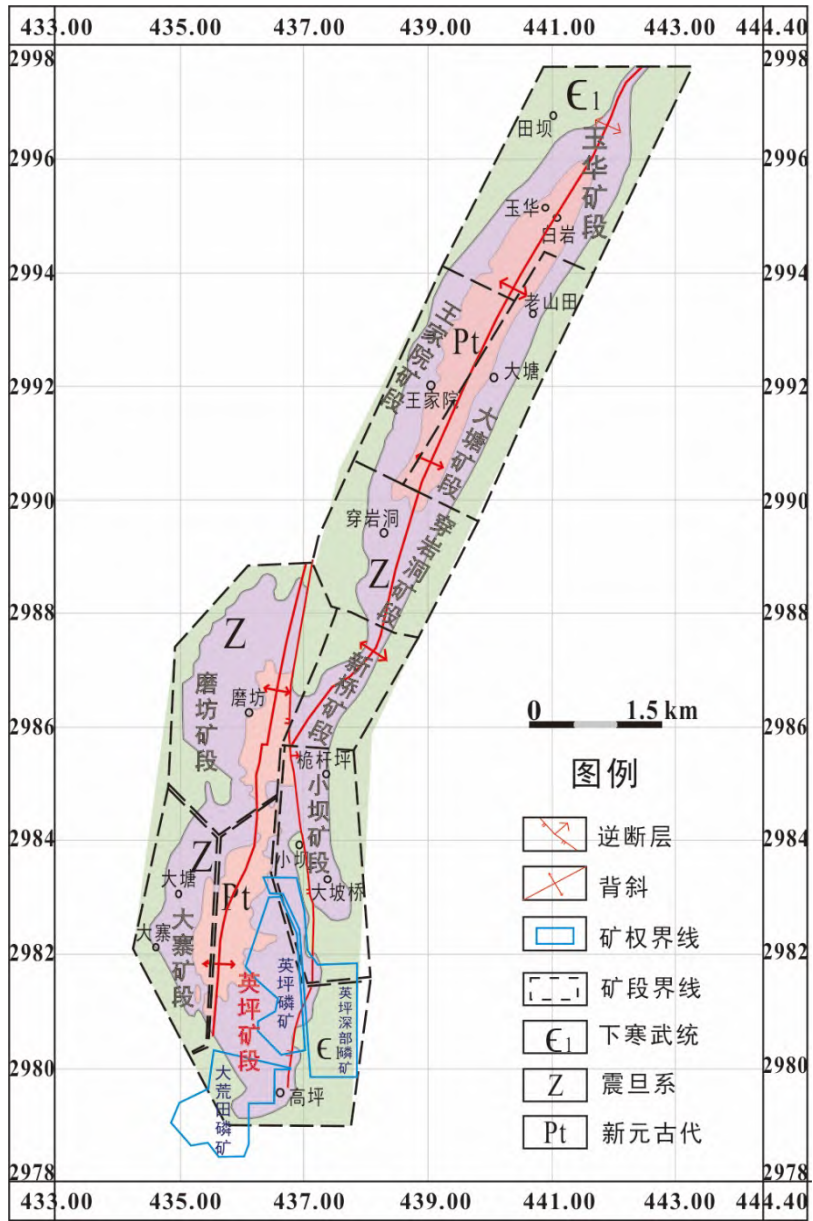
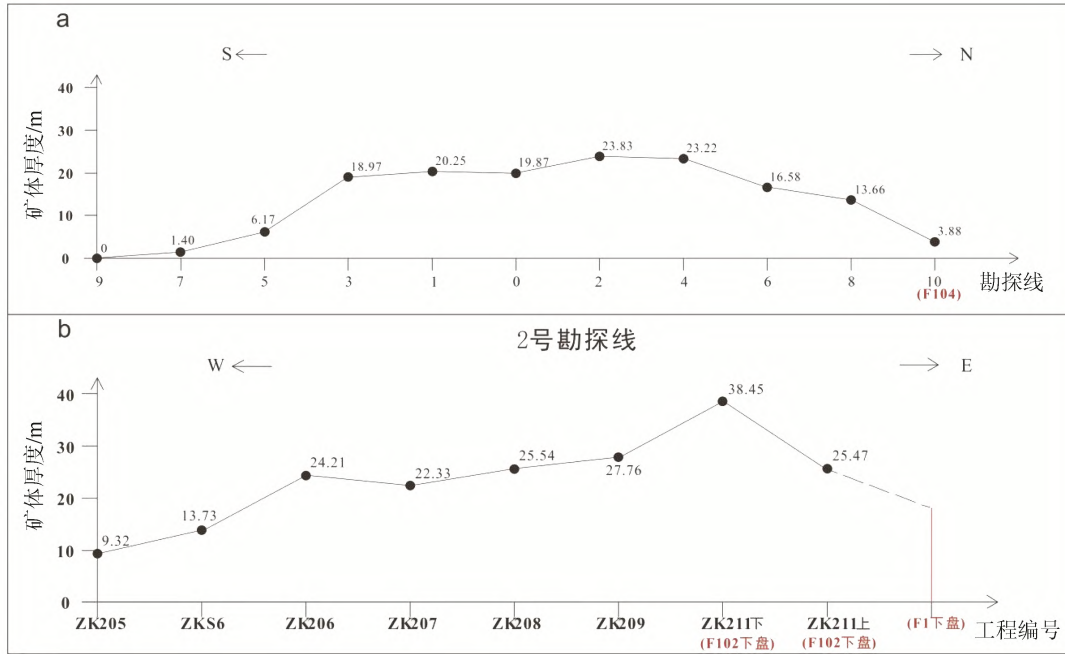


图 1 瓮福磷矿地质质简图及矿段划分示意图 (据参考文献[13-14]修改)
 Fig. 1. Simplified geological map showing various oreblocks of the Wengfu phosphorite deposit.



a. 沿走向变化特征; b. 沿倾向变化特征

图 2 英坪深部磷矿 II 号矿体 B 矿层厚度的空间展布特征 (据文献[15]修改)

Fig. 2. Spatial distribution characteristics of the B ore layer thickness in II ore body in the deep part of the Yingping oreblock.

2 研究方法

多项式趋势面分析是利用多元回归原理, 计算 1 个数学曲面来拟合数据的区域性变化趋势, 石油和天然气等地质数据通常采用的拟合曲面为不规则点 (非正交) 的多项式趋势面^[9]。最常用的二次多项式趋势面方程表述如下:

$$Z = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3XY + b_4X^2 + b_5Y^2 \quad (1)$$

其中 Z 为因变量; X 和 Y 为自变量; $b_j (j=0\sim5)$ 为多项式系数。不同次数的多项式趋势面方程可照此类推。对于 1 组观测数据, 通过 SPSS 软件的线性回归分析, 可求出不同次数的多项式方程。

趋势面对原始数据的逼近程度可用离差平方和来表示:

$$S_t = \sum_{i=1}^n (Z_i - \hat{Z}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{Z}_i - \bar{Z})^2 \quad (2)$$

式中 Z_i 代表观测值; \bar{Z} 为观测值平均值; \hat{Z}_i 为通过趋势面方程计算得到的趋势值。 S_t 代表总离差平方和, 公式右侧的第 1 项被称为残差平方和或剩余平方和 (S_r), 是观测值与趋势值之差的平方和, 第 2 项被称为回归平方和 (S_f), 是趋势值与观测值平均值之差的平方和。

定义拟合度 (C) 为:

$$C = (S_f/S_t) \times 100\% \quad (3)$$

拟合度表征趋势值与观测值之间的吻合程度, S_f 越大, 拟合度 C 越大, 代表趋势面方程对原始观测数据的拟合程度更好。

趋势面的显著性可以进一步使用 F 分布进行检验, 检验统计值 F 计算如下:

$$F = (S_f/p)/(S_r/(n-p-1)) \quad (4)$$

式中 p 代表多项式趋势面的自由度或项数 (不包括常数项 b_0); n 代表观测点数量。在给定检验水平 α 后, 若 $F > F_{\alpha}(p, n-p-1)$, 则可以认为趋势面对观测值的拟合是显著的, 可以采用; 否则是不显著的, 不应采用^[10]。

表 1 英坪矿段 89 项勘探工程的相关参数

Table 1. Relevant parameters for data of 89 items of exploration projects in the Yingping oreblock

工程	X/km	Y/km	B 矿层厚度/m	趋势值/m	剩余值/m	工程	X/km	Y/km	B 矿层厚度/m	趋势值/m	剩余值/m
ZK606	7.08	2.41	7.61	18.16	-10.55	TC1101NW	6.36	-0.15	0.13	-0.33	0.46
ZK209	7.52	1.66	19.41	27.24	-7.83	ZK307	7.33	0.75	16.12	15.65	0.47
ZK101	6.80	1.20	8.87	14.65	-5.78	ZK207	7.13	1.72	21.99	21.51	0.48
ZK205	6.66	1.85	9.32	14.96	-5.64	TC1102NW	6.23	-0.17	0.81	0.29	0.52
ZK203	6.47	1.90	7.29	12.55	-5.26	TC904NW	6.35	0.12	2.68	2.15	0.53
ZKS6	6.83	1.87	12.43	17.27	-4.84	ZK804	6.71	2.77	13.89	13.20	0.69
ZKS9	6.88	0.56	4.39	9.11	-4.72	ZK015	6.27	1.65	10.16	9.36	0.80
ZK008	6.78	1.51	11.34	16.00	-4.66	ZK605	6.99	2.39	18.32	17.46	0.86
ZK007	6.59	1.57	8.80	13.45	-4.65	ZK109	7.87	0.87	23.77	22.84	0.93
ZK703	6.67	0.30	0.00	4.56	-4.56	ZK705	6.59	0.32	5.52	4.54	0.98
ZK1+01	6.79	1.11	10.06	14.03	-3.97	ZKS5	7.07	1.46	20.92	19.87	1.05
ZK505	7.25	0.46	5.79	9.42	-3.63	ZK108	7.72	0.95	24.14	22.99	1.15
ZK1002	6.79	3.05	7.47	11.09	-3.62	ZK405	6.74	2.15	17.03	15.81	1.22
ZK508	7.72	0.32	2.86	6.39	-3.53	QJ1303	6.02	-0.14	2.78	1.50	1.28
ZK012	6.69	1.54	11.30	14.73	-3.43	TC1103NW	6.41	-0.15	0.85	-0.60	1.45
ZK017	7.34	1.38	20.39	23.38	-2.98	ZK404	7.05	2.05	21.38	19.84	1.54
ZK201	6.31	1.97	7.96	10.78	-2.82	ZK403	6.92	2.10	19.63	18.08	1.55
ZK107	7.49	0.96	17.88	20.65	-2.77	ZK202	6.38	1.94	13.19	11.57	1.62
ZK006	7.19	1.42	18.71	21.46	-2.75	ZK301	6.62	0.93	12.31	10.68	1.63
ZK701	6.86	0.25	1.75	4.08	-2.33	ZK802	6.89	2.70	16.07	14.27	1.80
ZK704	7.04	0.19	0.88	3.10	-2.22	TC903N	6.29	0.08	3.77	1.90	1.87
ZK1+02	6.72	1.11	10.91	13.07	-2.16	ZK105	7.19	1.07	20.51	18.59	1.92
QJ1104	5.64	-0.19	1.03	3.18	-2.15	ZK1003	6.92	3.01	13.52	11.17	2.35
ZK507	7.52	0.41	6.89	8.92	-2.04	ZK208	7.24	1.70	25.56	22.99	2.57
QJ1501	5.93	-0.68	0.50	2.30	-1.80	ZK304	7.02	0.83	16.87	13.98	2.89
ZK009	6.98	1.46	17.09	18.68	-1.59	ZK302	6.71	0.90	14.72	11.46	3.26
ZK803	7.05	2.70	13.66	15.09	-1.43	ZK602	6.51	2.52	17.27	13.19	4.08
ZK103	6.91	1.17	14.73	15.99	-1.26	ZK206	7.05	1.81	24.62	20.28	4.34
ZK303	6.84	0.87	11.47	12.62	-1.15	ZK104	7.12	1.10	22.46	18.13	4.34
QJ903	6.10	0.01	0.60	1.65	-1.05	ZK706	7.66	0.05	1.05	-3.60	4.66
QJ902	6.24	-0.06	0.34	0.98	-0.64	QJ1301	5.93	-0.16	6.61	1.87	4.74
ZK014	6.40	1.61	10.48	10.93	-0.45	ZK504	6.76	0.58	13.36	8.60	4.76
QJ901	6.32	-0.08	0.24	0.49	-0.25	ZK603	6.62	2.48	18.75	13.91	4.84
ZK903	6.60	0.01	0.33	0.52	-0.19	ZK305	7.22	0.77	20.93	14.91	6.02
ZK901	6.41	0.07	1.56	1.71	-0.15	ZK306	7.14	0.79	20.62	14.55	6.06
QJ1101	6.16	-0.16	0.73	0.81	-0.08	ZK1101	6.71	-0.33	0.00	-6.22	6.22
ZK106	7.32	1.05	19.95	20.02	-0.08	ZK503	6.65	0.62	14.46	8.20	6.26
QJ1102	5.70	-0.05	2.13	2.17	-0.04	ZK402	6.59	2.19	20.39	14.07	6.32
ZK902	6.50	0.03	1.15	1.14	0.01	ZK211	7.66	1.58	38.43	29.23	9.20
ZK801	6.62	2.80	12.99	12.88	0.11	ZK407	7.15	2.04	31.32	21.21	10.11
QJ1302	5.92	-0.41	2.35	2.11	0.24	ZK501	6.46	0.67	17.42	7.03	10.39
ZKCS3	7.08	0.13	1.90	1.66	0.24	ZK401	6.46	2.22	23.50	12.81	10.69
ZK001	6.87	1.48	17.59	17.20	0.39	ZK502	6.55	0.64	19.43	7.61	11.82
QJ1103	5.69	-0.08	2.78	2.38	0.40	ZKCS2	7.32	1.79	36.97	24.22	12.75

注：表中坐标为简化坐标系（单位：km），剩余值中的粗体代表正剩余，斜体代表正异常。

对于一组给定的数据，拟合的多项式趋势面次数越高，则拟合度也越高，但高次多项式趋势面在非观测区域的预测可能会产生较大的偏差。常用的方法是，通过拟合度和 F 检验值共同对趋势面次数作图，选择拟合度和 F 检验值发生较大变化的拐点来确定最优多项式趋势面的次数^[17]。

地质趋势面分析结果包含了 2 方面的信息：一是因变量的区域性变化规律，如上述确定的最优趋势面；二是因变量的局部异常。每个观测点因变量的观测值与趋势值之差被称为剩余值 (ΔZ_i)，即：

$$\Delta Z_i = Z_i - \hat{Z}_i \quad (5)$$

引进剩余值的概念后, 观测值即被分解为趋势值与剩余值, 趋势值反映因变量的区域性空间特征, 剩余值反映因变量的局部变化特点。需要注意的是, 剩余值并不完全等于局部异常, 它是局部异常分量 (A_i) 与随机因素造成的随机分量 (R_i) 之和, 即:

$$\Delta Z_i = A_i + R_i \quad (6)$$

石油和天然气地质中, 通常认为具有正值的正剩余 (ΔZ_i^+) 更能判定观测数据的局部异常, 在一定勘探区域内, 一般假设随机分量为常数并等于观测数据中所有正剩余的平均值, 进而可以计算具有正剩余的观测点的异常分量^[8], 即:

$$A_i = \Delta Z_i^+ - R_i = \Delta Z_i^+ - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Z_i^+ \quad (7)$$

英坪矿段分别于 1981 年和 2018 年完成了英坪磷矿和英坪深部磷矿的勘查工作, 本次研究收集了这 2 次勘查报告中 B 矿层磷块岩未经历明显后期破坏 (抬升剥蚀或构造破坏, 即具有明确的顶底板控制且没有大的断层错动) 的 88 项探矿工程资料, 对矿层厚度 (真厚, 下同) 及坐标数据进行了校对整理 (表 1), 对这些 B 矿层磷块岩的厚度特征进行统计分析。分别以上述 88 项勘探工程的 B 矿层厚度为因变量, 以地理坐标为自变量 (X 为经向坐标, Y 为纬向坐标), 开展 1 到 5 次的多项式趋势面分析; 以 B 矿层厚度的空间展布特征为基础, 根据拟合度、 F 检验值与趋势面次数的协同变化规律, 判定最优趋势面。应用 Python 或 Matlab 软件绘制趋势面在给定坐标范围内的二维或三维图像, 应用 Surfer 软件的 Kriging 插值法绘制 B 矿层厚度等值线图、趋势面剩余等值线图和异常 (正剩余) 等值线图。

3 结果与讨论

3.1 英坪矿段 B 矿层厚度的空间展布特征

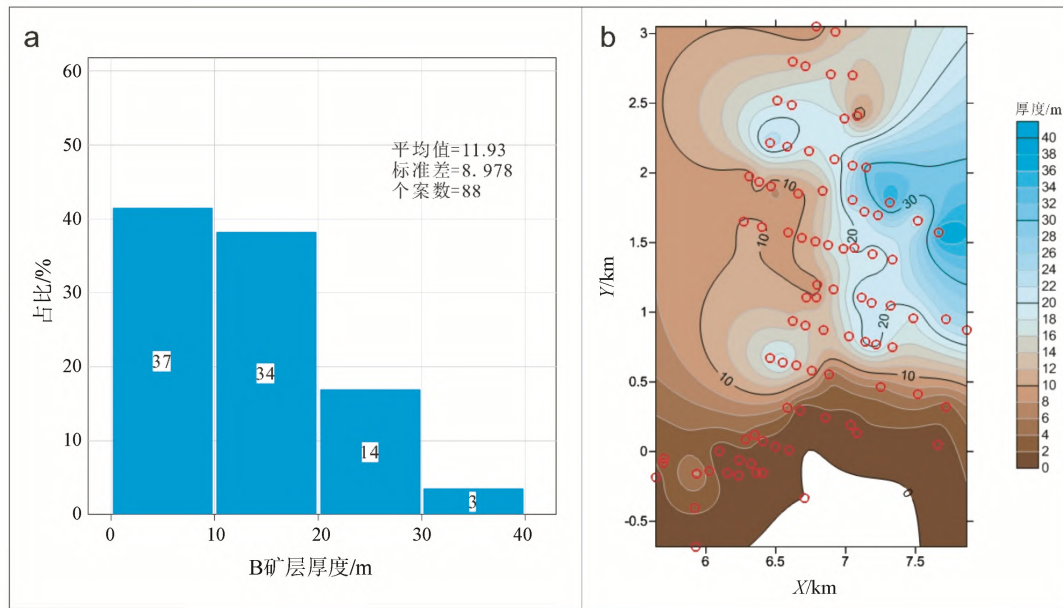
英坪磷矿 B 矿层的平均厚度为 13.35 m (1.75~26.20 m)^[13], 英坪深部磷矿 B 矿层的平均厚度为 18.48 m (1.75~38.43 m)^[15], 本次研究统计的 88 项勘探工程 B 矿层的平均厚度为 11.93 m (0.00~38.43 m), 由于排除了因断层导致矿层重复的部分工程, 增加了部分 B 矿层极薄乃至尖灭的部分工程, 导致平均厚度的降低。

88 项勘探工程中, B 矿层厚度为 0~10 m 的工程有 37 项 (占比 42.1%), 10~20 m 的工程有 34 项 (占比 38.6%), 20~30 m 的工程 14 项 (占比 15.9%), 30~40 m 的工程 3 项 (占比 3.4%) (图 3a)。相应 88 项工程 B 矿层厚度的等值线图显示 (图 3b), 英坪矿段南侧为明显的低值区, 中部从西向东逐渐增厚并在东侧出现椭圆状高值带, 包含了 3 口厚度大于 30 m 的钻孔, 表明在 B 矿层沉积时期, 中部东侧为凹陷带, 有利于磷质碎屑的堆积。英坪矿段两次勘查工作总结了 B 矿层的空间分布规律 (图 2): 厚度较大地段主要分布于矿段中部 (3 线—8 线), 矿层自西向东逐渐增厚, 南北方向上 10 线以北矿体厚度逐渐减小并在 10⁺²⁰⁰ 勘探线遭遇破矿断层 F₁₁₆ 错错落空, 3 线以南矿体厚度逐渐变薄直至 7 线附近矿层自然尖灭^[13, 15]。因此, 本次统计的 88 项工程 B 矿层的空间展布规律和前述勘查工作的认识基本一致。

3.2 坐标简化

趋势面分析中常根据因变量的空间展布范围而选择不同坐标体系, 矿床研究涉及的空间范围一般较小, 常采用简化的相对坐标体系^[18], 突出因变量在较小空间尺度内的变化。本研究选择勘探工作区最左下角的 1 个点作为新的原点, 所有勘探工程的原始坐标减去新原点的原始坐标, 平移简化能够完全保留勘探工程之间的相对空间关系。从表 2 中可见, 如采用原始坐标 (单位: m) 数据进行的 1~5 次多项式趋势面分析, 回归平方和稳定在 3724 左右, 自由度恒定为 2, 拟合度稳定在 53.11% 左右, 变

化不超过 0.01%， F 检验值稳定在 48.13 左右，变化不超过 0.03，仅从数据变化而言，难以甄选出最优趋势面。但简化坐标（单位：m）数据进行的 1~5 次多项式趋势面分析（表 2）表明，从 2 次趋势面开始，回归平方和、自由度和拟合度都明显增加， F 检验值明显降低，这样的变化有利于从数学意义上甄选出最优趋势面。进一步，将简化坐标（m）数据除以 1000，将坐标单位表征为 km，1~5 次多项式趋势面分析结果完全相同，说明坐标数据的等比缩放不影响变量之间的相关程度。因此，在英坪矿段的多项式趋势面分析研究中，为了数学表达和后续作图的简便，我们采用简化坐标（单位：km）进行相应的数据处理。



a. 统计直方图; b. 等值线图

图 3 瓮福磷矿英坪矿段 B 矿层厚度统计直方图和等值线图

Fig. 3. The statistics histogram and contour map for the B ore layer thickness in the Yingping oreblock from the Wengfu phosphorite deposit.

3.3 数据转换

地质工作中，常用的数据转换方法包括标准差标准化、极差正规化、极差标准化和平均值标准化，其目的是将变量间的非线性关系转换为线性关系。平均值标准化相当于变量的等比缩放，如表 2 所证明，不影响变量之间的相关程度；极差正规化和极差标准化相近，都是将变量数据约束到一个较小的固定区间内。因此，下面将重点讨论极差正规化和标准差标准化对多项式趋势面分析的影响。标准差标准化是将变量的每个观测值减去该变量的平均值，再除以该变量的标准差，转换后变量的平均值为 0，方差为 1；极差正规化是将变量的每个观测值减去该变量观测值的最小值，再除以该变量观测值的极差，转换后的数据分布在 0~1 之间。

3.3.1 因变量数据的极差正规化和标准差标准化

考虑固定自变量（不进行数据变换）而对因变量进行数据变换的情况，对比表 2 和表 3 的数据，可以发现，3 种情况下（因变量不变换、因变量极差正规化和标准差标准化）不同次数多项式趋势面的预测变量、自由度和 F 检验值完全相同，而拟合度的细微差别（0.01%~0.02%）来自于平方和数据四舍五入产生的误差，即因变量的数据变换基本不影响多项式趋势面分析结果。因此，针对英坪矿段的数据特征，可以完全不考虑对陡山沱组 B 矿层厚度数据进行数据变换。

表2 从原始坐标系到简化坐标系的1~5次多项式趋势面分析结果

Table 2. The results of 1-5 orders polynomial trend surface analysis from the original coordinate system to the simplified coordinate system

A. 原始坐标系 (单位: m)					B. 简化坐标系 (单位: m 或者 km)						
趋势面次数		平方和	自由度	F	拟合度	趋势面次数		平方和	自由度	F	拟合度
一次	回归	3573.411	2	43.63	50.36%	一次	回归	3573.411	2	43.63	50.36%
	残差	3521.787	86				残差	3521.787	86		
	总计	7095.198	88				总计	7095.198	88		
预测变量: (常量), Y, X					预测变量: (常量), Y, X						
二次	回归	3573.541	2	43.634	50.37%	二次	回归	4947.917	5	38.251	69.74%
	残差	3521.657	86				残差	2147.281	83		
	总计	7095.198	88				总计	7095.198	88		
预测变量: (常量), XY, Y ²					预测变量: (常量), XY, X ² , Y ² , Y, X						
三次	回归	3573.671	2	43.637	50.37%	三次	回归	5204.699	7	31.857	73.36%
	残差	3521.527	86				残差	1890.498	81		
	总计	7095.198	88				总计	7095.198	88		
预测变量: (常量), XY ² , Y ³					预测变量: (常量), XY ² , X ³ , Y, Y ³ , X, X ² Y, Y ²						
四次	回归	3573.801	2	43.64	50.37%	四次	回归	5229.245	8	28.025	73.70%
	残差	3521.397	86				残差	1865.952	80		
	总计	7095.198	88				总计	7095.198	88		
预测变量: (常量), XY ² , Y ⁴					预测变量: (常量), XY ² , X ⁴ , Y, X ³ Y, X, Y ² , Y ⁴ , X ² Y ²						
五次	回归	3573.948	2	43.644	50.37%	五次	回归	5295.298	9	25.824	74.63%
	残差	3521.249	86				残差	1799.9	79		
	总计	7095.198	88				总计	7095.198	88		
预测变量: (常量), X ⁴ Y, Y ⁵					预测变量: (常量), X ⁴ Y, X ⁶ , Y ⁶ , Y, X, Y ² , X ² Y ³ , Y ³ , X ³ Y ²						

注: 简化坐标系 (单位: m) 和简化坐标系 (单位: km) 的分析结果完全一致。

表3 固定自变量对因变量进行数据转换的1~5次多项式趋势面分析结果

Table 3. The 1-5 orders polynomial trend surface analysis results for the data transversion of dependent variables when fitting independent variables

A. 因变量极差正规化					B. 因变量标准差标准化						
趋势面次数		平方和	自由度	F	拟合度	趋势面次数		平方和	自由度	F	拟合度
一次	回归	2.42	2	43.63	50.36%	一次	回归	44.824	2	43.63	50.36%
	残差	2.385	86				残差	44.176	86		
	总计	4.805	88				总计	89	88		
预测变量: (常量), Y, X					预测变量: (常量), Y, X						
二次	回归	3.351	5	38.251	69.74%	二次	回归	62.065	5	38.251	69.74%
	残差	1.454	83				残差	26.935	83		
	总计	4.805	88				总计	89	88		
预测变量: (常量), XY, X ² , Y ² , Y, X					预测变量: (常量), XY, X ² , Y ² , Y, X						
三次	回归	3.525	7	31.857	73.36%	三次	回归	65.286	7	31.857	73.36%
	残差	1.28	81				残差	23.714	81		
	总计	4.805	88				总计	89	88		
预测变量: (常量), XY ² , X ³ , Y, Y ³ , X, X ² Y, Y ²					预测变量: (常量), XY ² , X ³ , Y, Y ³ , X, X ² Y, Y ²						
四次	回归	3.541	8	28.025	73.69%	四次	回归	65.594	8	28.025	73.70%
	残差	1.264	80				残差	23.406	80		
	总计	4.805	88				总计	89	88		
预测变量: (常量), XY ² , X ⁴ , Y, X ³ Y, X, Y ² , Y ⁴ , X ² Y ²					预测变量: (常量), XY ² , X ⁴ , Y, X ³ Y, X, Y ² , Y ⁴ , X ² Y ²						
五次	回归	3.586	9	25.824	74.63%	五次	回归	66.423	9	25.824	74.63%
	残差	1.219	79				残差	22.577	79		
	总计	4.805	88				总计	89	88		
预测变量: (常量), X ⁴ Y, X ⁵ , Y ⁵ , Y, X, Y ² , X ² Y ³ , Y ³ , X ³ Y ²					预测变量: (常量), X ⁴ Y, X ⁵ , Y ⁵ , Y, X, Y ² , X ² Y ³ , Y ³ , X ³ Y ²						

3.3.2 自变量数据的极差正规化和标准差标准化

考虑固定因变量（不进行数据变换）而对自变量进行数据变换的情况，对比表 2 和表 4 的数据，基本规律是在 1 次、2 次和 3 次多项式趋势面分析中，3 种情况下（自变量不变换、自变量极差正规化和标准差标准化）的趋势面分析结果完全相同。从 4 次趋势面开始分析结果发生了一定的变化，从自变量未变换到极差正规化和标准差标准化，自由度有比较明显的增加，5 次趋势面最为明显，自由度从 9 分别上升为 13 和 20，趋势面方程的表达更为复杂；对应的 F 检验值明显下降，而拟合度仅仅表现为缓慢或有限上升（表 4）。因此，针对英坪矿段的数据特征，B 矿层厚度与地理坐标之间可能不存在明显的非线性因素，综合考虑拟合度的缓慢增加和多项式方程的复杂程度，多项式趋势面分析中可以基本不考虑对坐标数据进行数据变换。

3.4 英坪矿段 B 矿层厚度的多项式趋势面分析结果及判定

根据前面的讨论，我们在对英坪矿段 B 矿层厚度的多项式趋势面分析中采用简化坐标系（单位：km），对相应变量不进行数据变换，对英坪矿段 88 项探矿工程 B 矿层厚度数据进行了一次到五次多项式趋势面分析，相关结果见表 2。从 1 次到 5 次趋势面， F 检验值从 48.13 下降到 31.98，拟合度 C 从 53.11% 上升到 78.68%（图 4f）。其中， F 检验值的最大变化发生在从 2 次趋势面到 3 次趋势面（下降 6.49），其次为从 3 次趋势面到 4 次趋势面（4.81）。拟合度的最大变化发生在从 1 次趋势面到 2 次趋势面（增加 20.44%），其次为从 2 次趋势面到 3 次趋势面（增加 3.84%）。检验值和拟合度的最大转折没有协同变化，需要结合 B 矿层的空间展布特征（图 3b）进行最优趋势面判定。

表 4 固定因变量对自变量进行数据转换的 1~5 次多项式趋势面分析结果

Table 4. The 1–5 orders polynomial trend surface analysis results for the data transversion of independent variables when fitting dependent variables

A. 坐标极差正规化处理					B. 坐标标准差标准化处理					
趋势面次数	平方和	自由度	F	拟合度	趋势面次数	平方和	自由度	F	拟合度	
一次	回归	3573.411	2	43.630	50.36%	回归	3573.411	2	43.63	50.36%
	残差	3521.787	86			残差	3521.787	86		
	总计	7095.198	88			总计	7095.198	88		
预测变量: (常量), Y, X					预测变量: (常量), Y, X					
二次	回归	4947.917	5	38.251	69.74%	回归	4947.917	5	38.251	69.74%
	残差	2147.281	83			残差	2147.281	83		
	总计	7095.198	88			总计	7095.198	88		
预测变量: (常量), XY, X^2, Y^2, X, Y					预测变量: (常量), XY, X^2, Y^2, X, Y					
三次	回归	5260.349	9	25.165	74.14%	回归	5260.349	9	25.165	74.14%
	残差	1834.849	79			残差	1834.849	79		
	总计	7095.198	88			总计	7095.198	88		
预测变量: (常量), $XY^2, X^3, X, Y, Y^3, X^2Y, X^2, Y^2, XY$					预测变量: (常量), $XY^2, X^3, X, Y, Y^3, X^2Y, X^2, Y^2, XY$					
四次	回归	5318.833	10	23.355	74.96%	回归	5375.843	14	16.527	75.77%
	残差	1776.365	78			残差	1719.354	74		
	总计	7095.198	88			总计	7095.198	88		
预测变量: (常量), $XY^3, X^4, X, Y, X^3Y, Y^4, X^2, Y^2, XY, X^2Y^2$					预测变量: (常量), $XY^3, Y^4, X^4, X, Y, X^3, XY^2, XY, Y^2, X^2Y, X^2, X^2Y^2, Y^3, X^3Y$					
五次	回归	5385.368	13	18.171	75.90%	回归	5586.259	20	12.587	78.73%
	残差	1709.83	75			残差	1508.938	68		
	总计	7095.198	88			总计	7095.198	88		
预测变量: (常量), $X^4Y, Y^5, X, Y, X^5, X^2Y^3, X^2, Y^3, XY, X^3Y^2, X^3, Y^2, XY^2$					预测变量: (常量), $X^4Y, Y^4, X, Y, XY, XY^4, X^2, X^5, XY^3, Y^2, X^4, Y^3, X^2Y^2, X^2Y, XY^2, X^3Y^2, Y^2, X^2Y^3, X^2, X^3Y$					

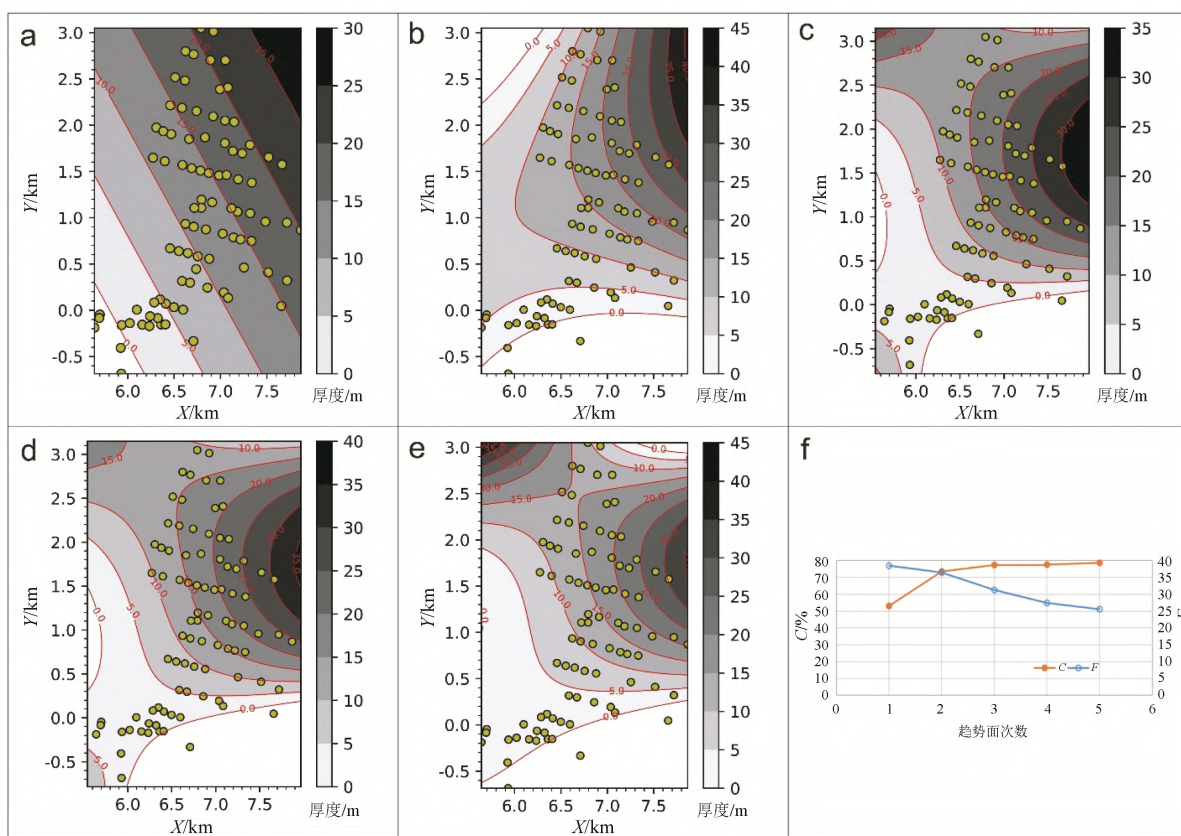
1 次趋势面的二维特征非常简单, 表现为 B 矿层厚度从西南角到东北角的单调递增 (图 4a)。2 次趋势面表现为 B 矿层厚度从中部向南和西北方向逐渐变薄, 向东北方向逐渐变厚, 南侧和西北角为未接受沉积的高地, 东北角为厚度最大的凹陷 (图 4b)。3 次趋势面表现为 B 矿层沉积中心在中部东侧, 向西、向北和向南总体逐渐减薄, 东南角为高地, 中部西侧边缘可能为高地 (无工程控制) (图 4c)。4 次趋势面表征的 B 矿层分布特征与 3 次趋势面非常相似 (图 4d)。5 次趋势面体现为中部东侧和西北角 2 个沉积中心, 向西、向南逐渐减薄, 东南角为高地 (图 4e)。对比 B 矿层厚度的等值线图 (图 3b), 3 次与 4 次趋势面的二维特征与 B 矿层厚度空间分布特征都非常吻合, 考虑到高次趋势面在无工程控制区域可能产生更大的畸变^[10], 结合 F 检验值和拟合度的变化规律 (图 4f), 我们综合判定 3 次趋势面为最优趋势面。

对于 3 次趋势面, 拟合度为 77.39%, 给定检验水平 $\alpha=0.001$, 查表得 $F_{0.001}(7, 87) \approx 3.94$, $F=39.11 > 3.94$, 表明该趋势面能显著表征英坪矿段 B 矿层厚度的空间变化, 具体表述为:

$$Z = -34.689 + 9.675X - 61.9Y + 46.528Y^2 - 0.1X^3 + 0.247Y^3 + 1.754X^2Y - 7.699XY^2$$

3.5 剩余值和异常分析

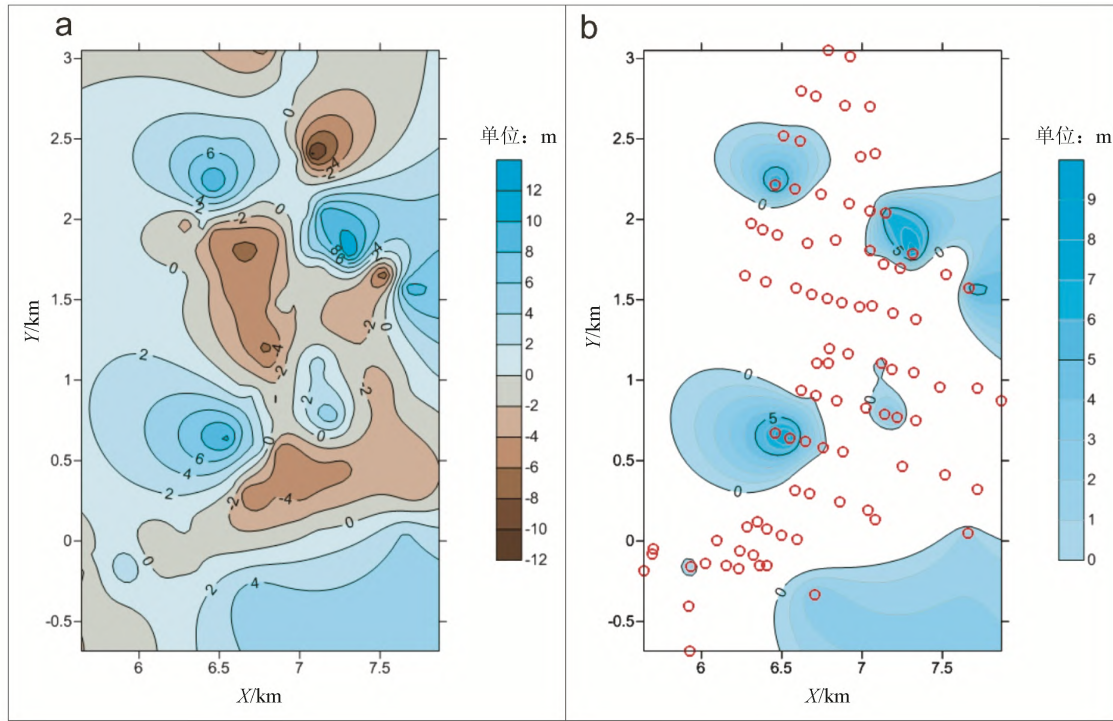
剩余值等值图中零值线的区域走向特征一般可反映区域断裂的分布情况。英坪矿段 B 矿层最优多项式趋势面的剩余值等值线图见图 5a, 其中的零值线未表现出明显的线性趋势, 表明区域断裂对 B 矿层的空间展布影响较小, 和前述地质观察中“矿体构造复杂程度为简单”的特征吻合。



a-e. 分别为 1~5 次趋势面; f. 三次趋势面的检验值和拟合度协同变化关系

图 4 英坪矿段 B 矿层厚度 1~5 次多项式趋势面二维图像及最优趋势面判定

Fig. 4. Two-dimensional images of 1-5 orders polynomial trend surface and discrimination of the optimal trend surface for the B ore layer thickness in the Yingping oreblock.



a. 剩余值等值线图; b. 正剩余等值线图

图 5 英坪矿段 B 矿层厚度最优多项式趋势面的剩余值和正剩余等值线图

Fig. 5. Contour maps of residual values and positive anomalies of the optimal trend surface for the B layer thickness in the Yingping oreblock.

英坪矿段的 88 项勘探工程中, 最优多项式趋势面拟合后有 50 项工程具有正剩余, 正剩余的平均值即随机分量为 3.30, 减去随机分量后有 18 项工程具有正异常, 其余未超过随机分量的工程不视为异常点, 正异常等值线图 (图 5b) 表明, 正异常主要集中在英坪矿段的中部东侧。

3.6 英坪矿段的古地貌和岩相古地理分析

瓮福地区的磷块岩主要为不同粒度的磷质碎屑组成的碎屑磷块岩, 代表了来源于周边海底高地的化学沉积磷块岩经历剥蚀作用后的物理沉积, 表征了在不同水深台地相中的机械填平作用。因此, 最优多项式趋势面拟合的 B 矿层磷块岩厚度的负值在一定程度上反映了 B 矿层沉积之前的古地貌特征。相应的图 6c 展示了晚陡山沱期英坪地区总体上为近东西向的台地凹陷, 西部为浅滩, 东部水深可达 30 m 左右, 北部为水下高地, 南部东端为孤岛。

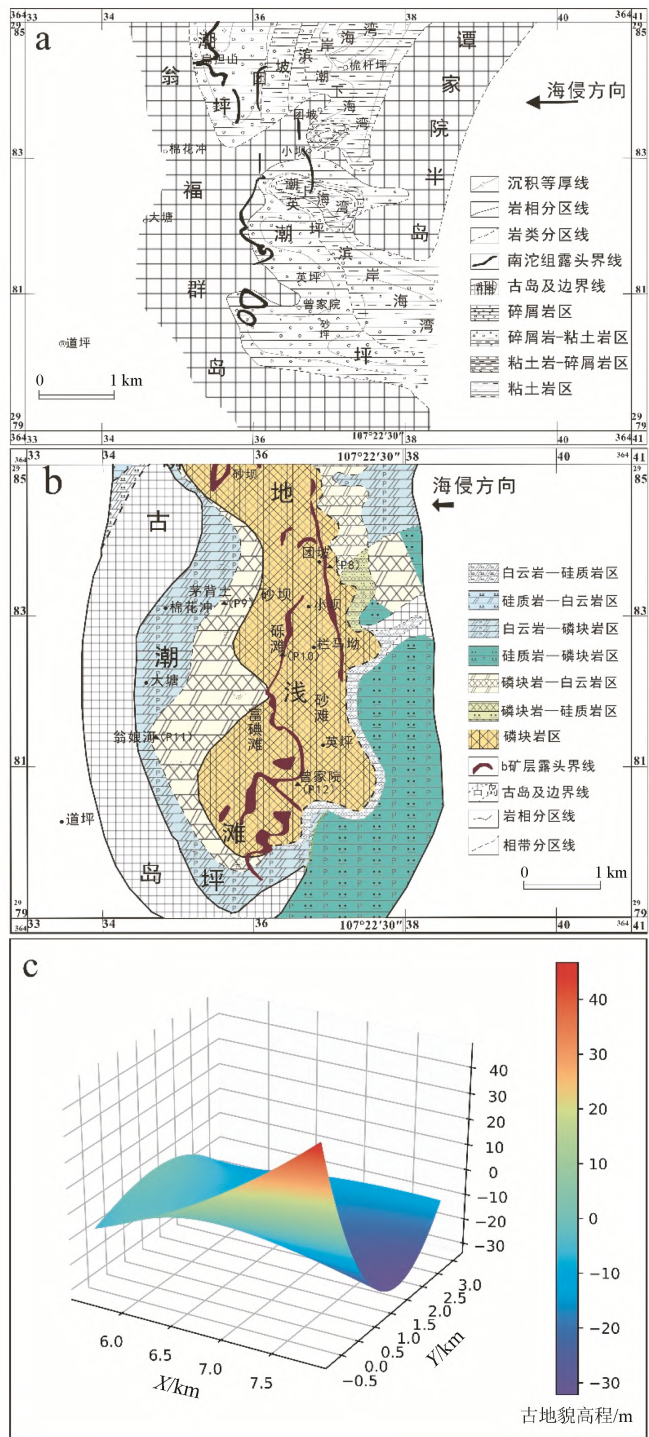
瓮福古岛 (也被称为黔中台地或黔中古陆) 在埃迪卡拉纪的演化对于陡山沱期大规模成磷事件具有决定性作用^[12], 此外, 瓮福古岛东侧的近北东向黄平上塘—麻江青平隆起是黔中地区最大的古隆起, 陡山沱期可能形成障壁岛, 进一步促进了瓮福地区潟湖的发育^[19]。南沱期瓮福古岛规模较大, 对于英坪矿段而言, 西侧和南侧为古岛, 北侧为谭家院半岛, 东侧与广海连通, 形成三侧受限的英坪海湾^[20]

(图 6a)。晚陡山沱期由于风化剥蚀和更强的海进, 瓮福古岛规模相对收缩, 主要表现为北侧的谭家院半岛和南侧湾子一带古岛的大面积缩减^[20] (图 6b)。本次研究表明 (图 6c), 英坪矿段北侧的水下高地可能是收缩的谭家院半岛的一部分; 南侧东端为孤岛, 南侧西段为浅滩 (产出大荒田磷矿) 并与瓮福古岛相连, 湾子一带应该为断续连通广海的半岛 (本文命名为湾子半岛); 东侧为与广海连通的主要通道, 但可能受到黄平上塘—麻江青平障壁岛的限制。因此, 瓮福古岛、上塘-青平障壁岛、湾子半岛和谭家院水下高地的共同圈闭是形成英坪潟湖的重要因素。

3.7 找矿预测

通过与英坪矿段 B 矿层的厚度等值线对比, 结合拟合度和检验值变化规律, 我们判定英坪矿段的最优多项式趋势面为 3 次趋势面。最优多项式趋势面负值表征的古地貌特征及岩相古地理研究共同揭示了英坪矿段为四面受限的潟湖, 但东侧的上塘-青平障壁岛与英坪矿段之间还有较大距离, 暗示了英坪潟湖东侧可能具有较好的成矿潜力。最优趋势面的二维平面图像的主体部分为轴向近 EW 的扁平椭圆的一部分, 其西侧和南侧为厚度低值区, 近轴部主要由 B 矿层厚度为 20~30 m 的钻孔构成高值区 (图 4c), 最优多项式趋势面的正异常 (图 5b) 也集中在英坪矿段中部东侧。

尽管英坪矿段东北端缺乏钻孔控制, 但东北端向北外延为小坝矿段的桅杆坪磷矿, 该磷矿的 B 矿层平均厚度为 12.09 m, 估算储量 (探明+控制+推断) 约 6700 万 t^[14]。2018 年的勘探工作也证实了英坪深部磷矿 2~3 线东侧外围为 II 号矿体的倾向延伸, 三口钻孔 (ZK108、ZK109 和 ZK212) 控制的 B 矿层平均真厚为 16.39 m^[15]。上述勘探资料证明了本次研究获得的英坪矿段最优多项式趋势面能有效表征 B 矿层的空间展布规律, 共同表明了英坪矿段东侧具有寻找厚大 B 矿层磷块岩的潜力。值得关注的是, 英坪矿段矿权范围内已探明磷块岩资源量约 1.85 亿 t^[13, 16], 目前英坪矿段的勘探范围约占最优趋势面椭圆的一半, 东侧的一半还没有勘探工程控制。综合上述研究成果, 我们预测英坪矿段勘探区范围东侧还具有较大的找矿空间。



a. 南沱期的岩相古地理; b. 晚陡山沱期的岩相古地理;
c. 晚陡山沱期的古地貌 3D 特征

图 6 英坪矿段晚陡山沱期的古地貌特征及其岩相古地理演化 (a 和 b 图据文献[20]修改)

Fig. 6. Paleogeomorphological characteristics and lithofacies paleogeography evolution of the Late Doushantuo period in the Yingping oreblock.

4 结 论

1) 对于勘探范围为 10 km^2 左右的英坪矿段, 通过坐标平移进行坐标简化, 能更加突出磷块岩厚度的空间演化趋势。因变量 (B 矿层厚度) 的数据转换对变量之间的相关程度没有影响; 自变量 (坐标位置) 的等比例缩放不影响变量之间的相关程度, 但标准差标准化、极差正规化和极差标准化对变量之间的相关程度有微弱影响, 主要表现为 3 次 (包括) 以上的多项式回归分析中预测变量取舍导致的差异。

2) 英坪矿段 B 矿层厚度的 1~5 次多项式趋势面的拟合度和 F 检验值未能同步变化, 结合 B 矿层厚度等值线图的特征, 本次研究判定 3 次多项式趋势面为最优趋势面; 相应的剩余值等值线图表明断层对 B 矿层空间展布的影响较小, B 矿层厚度的正异常主要集中在英坪矿段的中部东侧。最优多项式趋势面趋势值的负值进一步表征了晚陡山沱期英坪矿段为从西缘瓮福古岛逐渐向东变深的潟湖, 北侧和南侧分别为谭家院水下高地和湾子半岛, 远东方向可能受上塘—青平障壁岛限值。

3) 根据已有的岩相古地理研究成果和勘探工程资料, 结合本次研究获得的最优多项式趋势面特征, 综合预测英坪矿段东侧具有寻找厚大 B 矿层磷块岩的较大找矿空间。

4) 贵州瓮福磷矿英坪矿段的示范性研究表明, 多项式趋势面分析能有效表征磷块岩矿层的空间展布特征。建议在磷块岩深部勘探中, 在地质构造分析的基础上, 构建目标矿层的空间坐标和真厚度数据库, 通过多项式趋势面分析对目标矿层的空间展布规律进行定量动态预测, 合理布置勘探工程, 规避勘探风险, 提高找矿效率。

参 考 文 献:

- [1] Planavsky N J, Rouxel O J, Bekker A, et al. The evolution of the marine phosphate reservoir[J]. *Nature*, 2010, 467 (7319): 1088-1090.
- [2] Smil V. Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences[J]. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2000, 25: 53-88.
- [3] 孙小虹, 陈春琳, 王高尚, 等. 中国磷矿资源需求预测[J]. *地球学报*, 2015, 36 (2): 213-219.
- [4] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- [5] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告[M]. 北京: 地质出版社, 2020.
- [6] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
- [7] 张启锐. 地质趋势面分析[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [8] 刘绍平, 汤军, 许晓宏. 数学地质方法及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- [9] 何文全. 昆阳磷矿床数学模型初步研究[J]. *云南地质*, 2001, 20 (1): 86-94.
- [10] 刘建中, 王泽鹏, 杜远生, 等. 贵州开阳以东震旦系陡山沱组磷矿富磷机制与“三位一体”预测找矿重大突破[J]. *古地理学报*, 2020, 22(5): 913-928.
- [11] 向明坤, 杨正坤, 谢选雄, 等. 贵州省福泉市磨坊深部磷矿勘探报告[R]. 贵阳: 贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院. 2019.
- [12] 陈国勇, 杜远生, 张亚冠, 等. 黔中地区震旦纪含磷岩系时空变化及沉积模式[J]. *地质科技情报*, 2015, 34 (6): 17-25.
- [13] 肖意泉, 经庚亮, 毛铭曾, 等. 贵州瓮安磷矿高坪矿区英坪矿段详细勘探地质报告[R]. 贵州清镇: 贵州省地矿局一一五地质大队. 1981.
- [14] 宋小军, 巩鑫, 曾凡祥, 等. 贵州省福泉市桅杆坪磷矿勘探报告[R]. 贵阳: 贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院. 2021.
- [15] 宋小军, 曾凡祥, 薛洪富, 等. 贵州省福泉市英坪深部磷矿勘探报告[R]. 贵阳: 贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院. 2018.
- [16] Xiao S, Muscente A D, Chen L, et al. The Weng'an biota and the Ediacaran radiation of multicellular eukaryotes[J]. *National Science Review*, 2014, 1 (4): 498-520.
- [17] 周子鹏, 古瑶. 基于趋势面分析研究含水层的富水性特征[J]. *煤炭技术*, 2021, 40 (7): 126-129.
- [18] Nayak B K, Sahu S K, Sahoo R K. Trend surface modelling of Karlapat bauxite deposit, Eastern Ghat Group, Orissa, India[J]. *Resource Geology*, 2002, 52 (3): 239-248.
- [19] 范玉梅. 黔中南华纪末期—震旦纪早期障壁岛及成磷控制作用[J]. *贵州地质*, 2017, 34 (3): 175-182+198.
- [20] 王志武, 祝德裕, 李忠惠, 等. 贵州瓮福磷矿地质特征和成矿规律研究报告[R]. 贵阳: 贵州省地矿局一一五地质大队, 1989.