

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.06.003

胶西北水旺庄金矿床 3000 m 深度找矿预测

刘向东^{1,2,3}, 周明岭^{1,3*}, 徐韶辉^{1,3}, 尹召凯^{1,3}, 徐忠华^{1,3}, 刘国栋^{1,3}, 范家盟^{1,3}
LIU Xiangdong^{1,2,3}, ZHOU Mingling^{1,3*}, XU Shaohui^{1,3}, YIN Zhaokai^{1,3}, XU Zhonghua^{1,3},
LIU Guodong^{1,3}, FAN Jiameng^{1,3}

1. 山东省第六地质矿产勘查院, 山东 威海 264209;

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

3. 山东省深部金矿探测大数据应用开发工程实验室, 山东 威海 264209

1. Shandong Provincial No.6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weihai 264209, Shandong, China;

2. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Shandong Provincial Big Data Application and Development Engineering Laboratory of Deep Gold Prospecting, Weihai 264209, Shandong, China

摘要:水旺庄金矿床位于胶西北招平断裂带北段玲珑金矿田东南缘, 累计探明金资源量逾 180 t, 已控制矿体最大垂深 2200 m。目前, 胶西北主要金矿田深部找矿的深度均已达 2000 m, 正确认识 3000 m 深度的找矿前景, 既是该区域进一步开展深部找矿的现实需要, 也对全国深部找矿具有重要的示范意义。通过对矿床地质特征、矿化富集规律、深部地球物理探测等研究, 预测了水旺庄金矿床的深部找矿前景, 并进行了深部钻探验证。同时, 对区内深部金资源潜力进行了讨论。研究表明, 水旺庄金矿床主要矿体严格受控于 NNE—NE 走向招平断裂带, 具有 NE 向侧伏和 SE 向倾伏的特征, 沿侧伏和倾伏方向金矿化具有分段富集的规律, 预测在 5 号勘探线以东、-2200 m 标高以深会出现新的矿化富集区。大地电磁测深剖面显示, 招平断裂带向深部延伸稳定, 沿倾向具有波状起伏的特征, 于 -2500~-3000 m 标高范围倾角明显变缓, 由 27° 变为 18°, 指示该区域具有良好的深部找矿前景。根据预测结果, 实施了 3000.58 m 钻孔进行验证, 于 2831.15~2832.65 m 深度探获厚 1.50 m、品位达 6.85 g/t 的金矿体。进一步分析认为, 招平断裂带北段深部找矿潜力巨大, 初步预测在 -2000~-3000 m 深度存在第三矿化富集带, 预测金资源量可能超 400 t。

关键词:深部找矿; 矿化富集规律; 水旺庄金矿床; 胶西北

中图分类号: P618.51; P542.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)06-0946-12

Liu X D, Zhou M L, Xu S H, Yin Z K, Xu Z H, Liu G D, Fan J M. Prospecting prediction and verification at a depth of 3000 m in the Shuiwangzhuang gold deposit, northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(6): 946-957

Abstract: The Shuiwangzhuang gold deposit is located at the southeast segment of the Linglong goldfield, northwestern Jiaodong Peninsula, with a pre-mining endowment more than 180 t of gold. The maximum controlled depth of the orebodies is 2200 m. At present, the prospect depth of main gold fields in the northwestern Jiaodong Peninsula has reached 2000 m, a correct understanding of the prospecting potential at a depth of 3000 m is not only a practical need for further deep prospecting in this region, but also has important demonstration significance for deep prospecting throughout the country. Basing on the research of geological characteristics, mineralization enrichment regularities and deep geophysical probing, deep prospecting potential of the Shuiwangzhuang gold deposit was implemented, and the deep drill hole was constructed to verify its effect. At the same time, the deep gold resources potential is discussed.

收稿日期: 2021-07-16; **修订日期:** 2022-01-22

资助项目: 国家自然科学基金项目 NSFC-山东联合基金《胶东深部金矿断裂控矿机理》(批准号: U2006201)、山东省重点研发计划《深部金矿资源评价理论、方法与预测》(编号: 2017CXGC1604) 和山东省地质矿产勘查开发局科技攻关项目《胶西北断裂系统及其与金成矿关系》(编号: KY202208)

作者简介: 刘向东(1989-), 男, 博士, 工程师, 从事金矿地质勘查与研究。E-mail: liuxiangdong807@foxmail.com

* **通信作者:** 周明岭(1968-), 男, 研究员, 从事金矿地质勘查与研究。E-mail: sddk807@163.com

The main orebodies are controlled by the NEE- to NE-trending Zhaoping fault system, with NE direction of lateral trending and SE direction of plunging. The orebodies segment into a number of enrichment zones along the lateral trending and plunging direction. The orebodies may extend to the east of No.5 exploration line, and below the depth of -2200 m. The MT profile shows that the Zhaoping fault system extend stably to the deep, and the dip angle changes from 27° to 18° at a depth of -2500 ~ -3000 m, indicating good prospecting potential. According to the prospecting results, a 3000.58 m drill hole was constructed, and one gold orebody with thickness of 1.5 m and gold grade of 6.85 g/t was found from 2831.15 m to 2832.65 m. Further analysis shows huge potential of the deep in the northern Zhaoping fault system. It is predicted that there exists a third mineralization enrichment zone at the depth of -2000 ~ -3000 m, and the gold resources may exceed 400 t.

Key words: deep prospecting; enrichment regularities of mineralization; the Shuiwangzhuang gold deposit; northwestern Jiaodong Peninsula

随着中国“找矿突破战略行动”的实施,胶东深部金矿勘查取得重大进展,累计探明金资源量已超 5000 t^[1-4],其中 80% 以上集中分布在胶西北的三山岛、焦家和招平 3 条成矿带上。水旺庄金矿床为近年在招平成矿带北段探明的一处特大型金矿床,累计探明金资源量逾 180 t^[5-8]。在三山岛和焦家成矿带深部则分别探明了北部海域、西岭、纱岭等资源量超过 300 t 的超大型金矿床^[9-10]。3 条成矿带中主要金矿田和矿区的勘查深度均达 2000 m,在三山岛和焦家成矿带分别施工了 4006 m 和 3266 m 深度的钻孔^[1,4]。然而,沿招平成矿带的最深勘查深度及探明的最大金矿床规模明显小于其他 2 条成矿带,该区域 3000 m 深度的找矿前景仍不明朗。正确认识招平断裂带北段 3000 m 深度的找矿前景,既是该区进一步开展深部找矿和深化认识胶东地区深部金资源潜力的现实需要,也对全国正在部署实施的“战略性矿产找矿行动”具有重要的示范意义。

本文在水旺庄金矿床深部找矿突破的基础上,通过深部矿体特征和矿化富集规律及地球物理探测研究,分析了矿床深部找矿前景,总结了实施的 3000.58 m 深度钻孔验证情况,进一步讨论了胶西北深部的找矿潜力,期望为胶东地区实现更大的深部金矿找矿突破提供重要依据。

1 地质背景

水旺庄金矿床位于华北板块东南缘郯庐断裂带以东的胶北地体内(图 1-a),区内岩石建造主要由前寒武纪变质基底、中生代花岗岩类及白垩纪沉积岩和火山岩组成,北部沿海地区分布有少量古近纪沉积物(图 1-b)。前寒武变质基底主要包括新太古代 TTG 和胶东群变质岩系^[14]、古元古代粉子山群和荆山群孔兹岩系^[15-16]、新元古代蓬莱群浅变质沉积岩^[17-18]。中生代花岗岩类主要由晚侏罗世

(165~150 Ma)玲珑和栾家河花岗岩^[19-20]、早白垩世早期(132~123 Ma)郭家岭型花岗岩^[21]和早白垩世晚期(118~110 Ma)伟德山型花岗岩^[22-23]组成。胶北地体以东为苏鲁地体,二者以五莲-青岛-烟台断裂为界,苏鲁地体主要由新元古代花岗质片麻岩、古元古代表壳岩夹榴辉岩组成,局部含超基性岩透镜体^[24]。区内构造以 NE-NNE 向断裂为主体,自西向东发育三山岛、焦家、招平、栖霞、桃村、牟平-即墨、五莲-青岛-烟台、海阳-青岛等断裂^[25-26],金矿床主要受三山岛、焦家、招平、栖霞等断裂控制。

水旺庄金矿床位于招平断裂带北段玲珑金矿田东南缘(图 2),区内岩石建造以中生代岩浆岩为主,含少量新太古代 TTG。中生代岩浆岩大体以招平断裂带为界,下盘主要为晚侏罗世玲珑花岗岩,花岗岩内发育大量 NNE 向闪长玢岩脉、煌斑岩脉等,上盘主要为晚侏罗世栾家河花岗岩,早白垩世郭家岭花岗岩侵入上述 2 种花岗岩内。新太古代 TTG 主要呈捕虏体分布于晚侏罗世栾家河花岗岩内。区内 NNE 向和 NE 向断裂构造发育,主要发育有招平断裂带、玲珑断裂和栾家河断裂,招平断裂带为主要控矿构造,该断裂在九曲村分为两支,一支走向不变,仍为 NE 向,称为破头青断裂,总体走向 60° ,倾向 SE,倾角 $28^{\circ} \sim 45^{\circ}$,沿该断裂分布有台上、东风、水旺庄等特大型金矿床^[5,8]。另一支转为 NNE 走向,称为九曲-蒋家断裂,总体走向 33° ,倾向 SE,倾角 $23^{\circ} \sim 33^{\circ}$,其与破头青断裂在九曲村附近会合,沿该断裂分布有九曲、阜山、大磨曲家等金矿床^[8]。招平断裂带下盘发育大量 NE 向和 NNE 向次级断裂,形成南西撒开、向北东聚敛的玲珑帚状构造。该帚状构造控制了区内金矿体(脉)的产出和分布。矿区沿断裂构造热液蚀变发育,主要热液蚀变类型有钾长石化、(黄铁)绢英岩化、硅化、绿

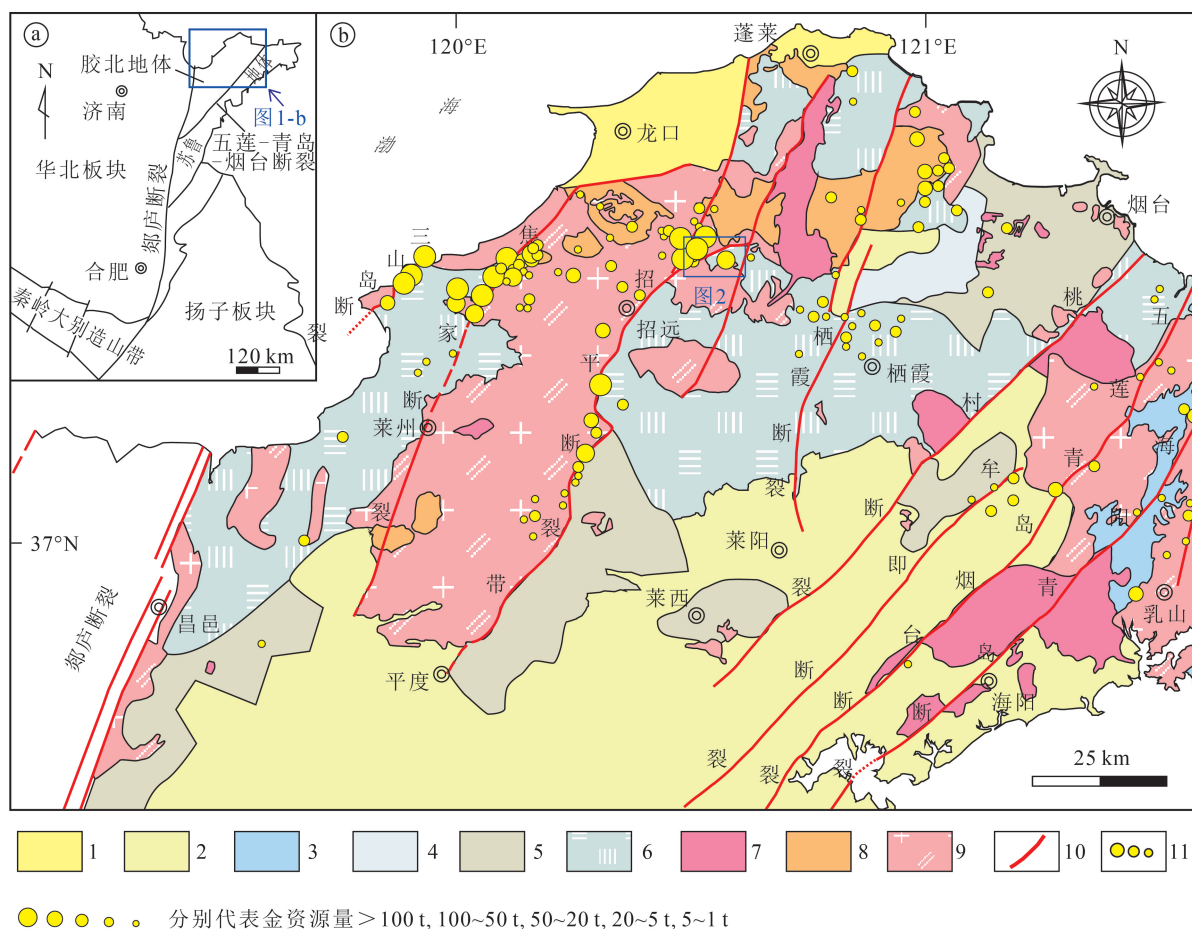


图1 胶西北区域地质简图(据参考文献[11~13]修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the northwestern Jiaodong Peninsula

1—古近纪沉积物;2—白垩纪沉积岩和火山岩;3—新元古代含榴辉岩花岗质片麻岩;4—新元古代蓬莱群变质岩;5—古元古代粉子山群和荆山群孔兹岩系;6—新太古代 TTG 和胶东岩群变质岩;7—早白垩世伟德山型花岗岩;8—早白垩世郭家岭型花岗岩;9—晚侏罗世玲珑和栾家河花岗岩;10—断裂构造;11—金矿床

泥石化、碳酸盐化等。

2 矿体特征和矿化富集规律

2.1 主要矿体特征

水旺庄金矿床累计探明金资源量 180 余吨,共有金矿体 197 个,均为深部隐伏矿体,其中②号矿体为主矿体,探明金资源量 150 t,约占矿区全部金资源量的 83%。

②号矿体分布于-810~-2200 m 标高范围内,主要赋存于(黄铁)绢英岩化碎裂岩带及(黄铁)绢英岩化花岗质碎裂岩带内。矿体呈似层状、大脉状,具有膨胀夹缩、尖灭再现特征,平均走向 20°,倾向 SE,倾角 15°~35°。矿体最大走向长 2560 m,最

大斜深 2410 m。矿体沿走向和倾向均未封闭(图 3)。矿石类型主要有(黄铁)绢英岩化碎裂岩型(图版 I-a)、(黄铁)绢英岩化花岗质碎裂岩型和黄铁绢英岩化花岗岩型,且以(黄铁)绢英岩化花岗质碎裂岩型为主。矿石金属矿物主要为黄铁矿,少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿(图版 I-b,c)。非金属矿物主要有石英、绢云母、钾长石、斜长石、方解石等(图版 I-b)。矿石结构以碎裂结构和变余花岗结构为主,其次为包含结构、填隙结构、交代溶蚀结构、交代残留结构、胶状结构、乳浊状结构等。矿石构造主要为浸染状、细脉状和网脉状,其次为块状、条带状、斑状、角砾状等。金矿物主要为自然金和银金矿,主要以可见金的形式呈不规则粒状分布于黄铁矿晶

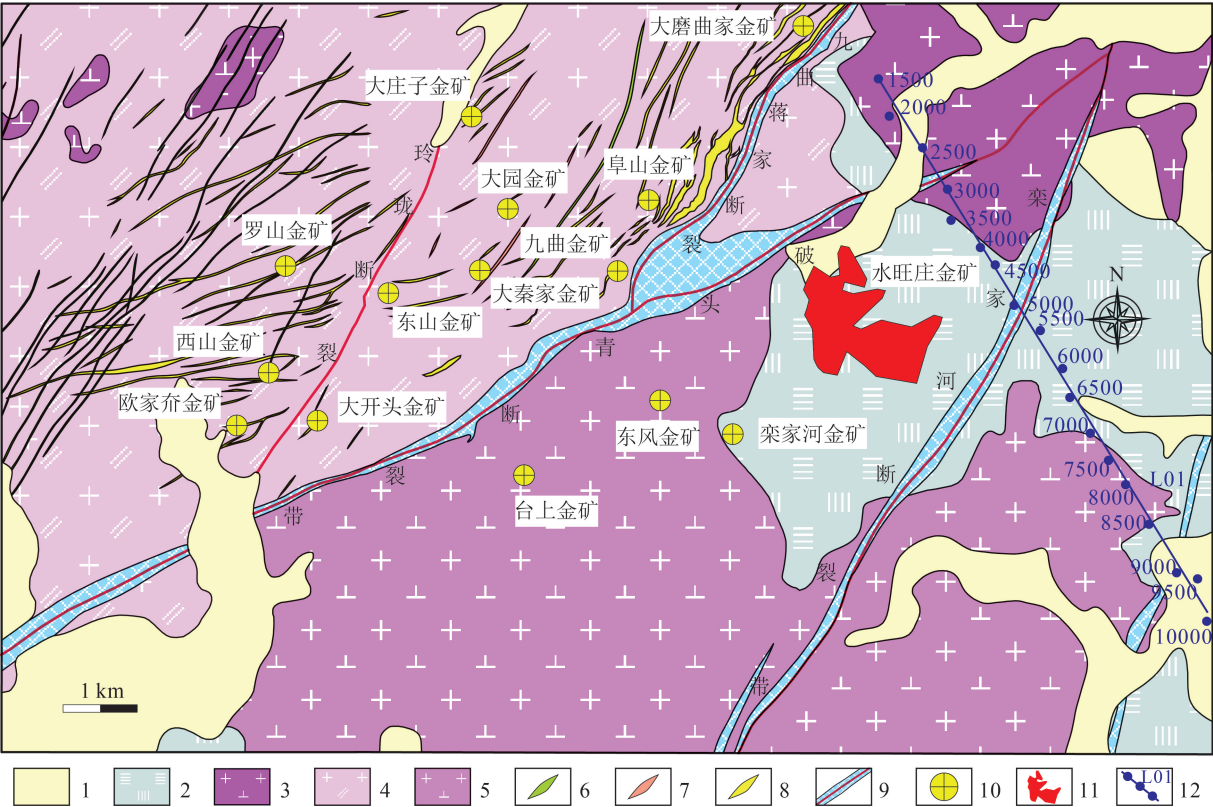


图 2 玲珑金矿田地质简图(据参考文献[7-8,27]修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Linglong gold field

1—第四纪沉积物;2—新太古代 TTG 和胶东岩群;3—早白垩世郭家岭型花岗岩;4—晚侏罗世玲珑花岗岩;5—晚侏罗世莱家河花岗岩;
6—闪长玢岩脉;7—闪长岩脉;8—含金石英脉;9—构造蚀变带;10—金矿床;11—矿体水平投影;12—大地电磁测深剖面(L01)位置及测点

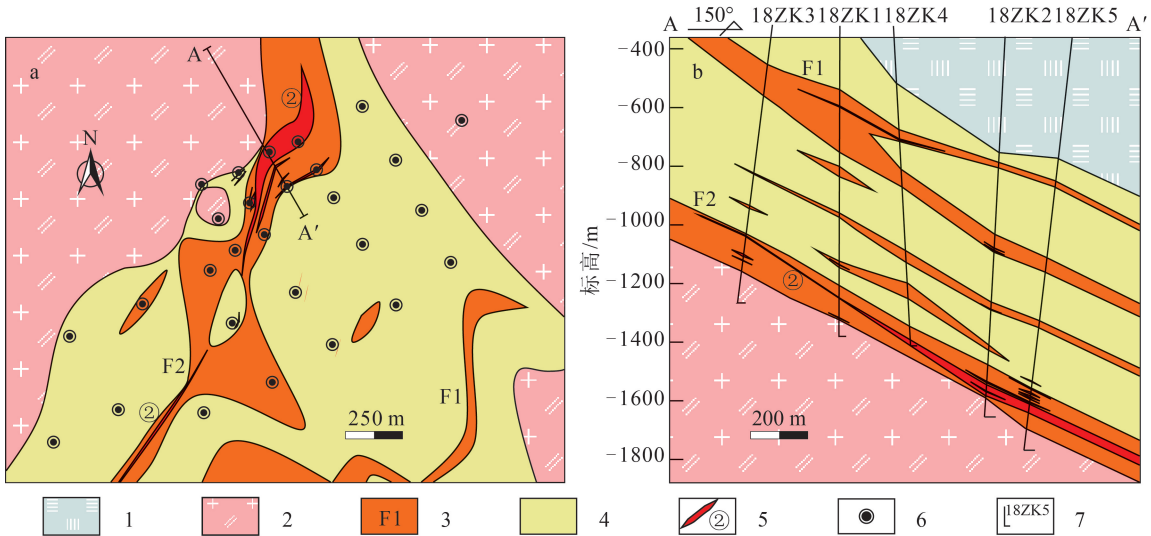
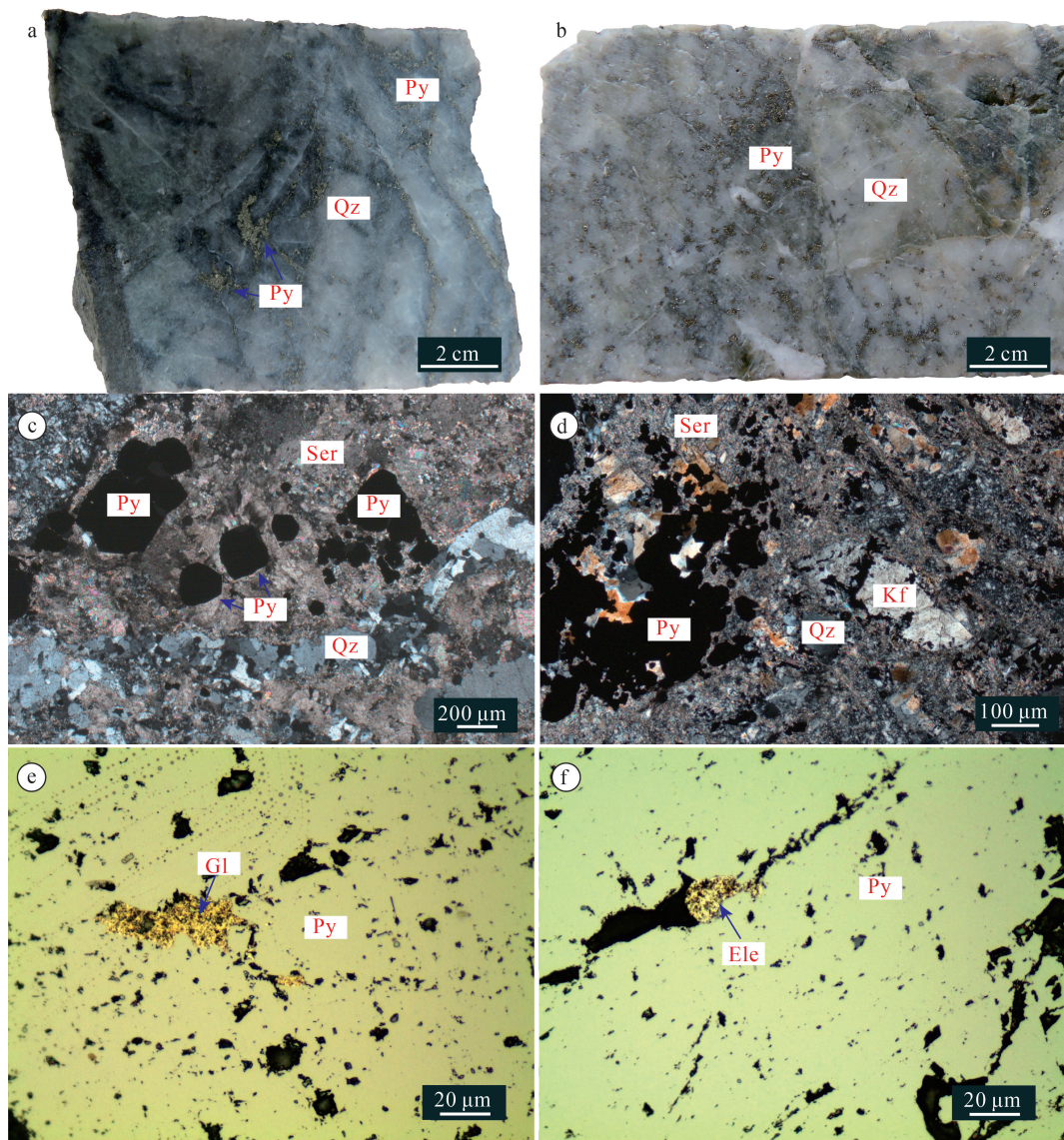


图 3 水旺庄金矿床-1600 m 中段平面图(a)及 18 号勘探线剖面图(b)

Fig. 3 Sketch map of the Shuiwangzhuang gold deposit plan view of the Shuiwangzhuang gold deposit (-1600 m) (a) and geological cross-section along No. 18 exploration line (b)

1—新太古代 TTG 和胶东岩群;2—晚侏罗世玲珑型花岗岩;3—黄铁绢英岩化蚀变带及编号(F1 为破头青断裂蚀变带,F2 为九曲-蒋家断裂蚀变带);4—绢英岩化花岗岩;5—矿体及编号;6—平面钻孔位置及编号;7—剖面钻孔位置及编号

图版 I Plate I



a. 黄铁绢英岩化碎裂岩型矿石, 黄铁矿呈小团块状和细脉状分布; b. 黄铁绢英岩化碎裂岩型矿石, 黄铁矿呈浸染状分布;
c. 黄铁绢英岩化碎裂岩型矿石中半自形—他形粒状黄铁矿; d. 黄铁绢英岩化碎裂岩型矿石中团块状分布黄铁矿; e. 自然金
呈不规则粒状分布在黄铁矿内; f. 银金矿呈不规则粒状分布在黄铁矿裂隙内。Ele—银金矿; Gl—自然金; Kf—钾长石;
Py—黄铁矿; Qz—石英; Ser—绢云母

隙或裂隙中及脉石矿物粒间, 或包裹于黄铁矿 (图版 I -d) 和石英晶体中。Au 品位为 1.02~41.07 g/t, 平均 4.27 g/t, 集中于 1.00~10.00 g/t。矿体厚度为 1.25~31.49 m, 平均 5.46 m。

2.2 矿化富集规律

水旺庄金矿床矿体空间分布及形态严格受控于断裂构造, 破头青断裂 (图 4 中 F1) 控制①号矿体群, 九曲—蒋家断裂 (图 4 中 F2) 控制②号矿体群, 二者之间的次级断裂构造控制③号矿体群。①号和③号矿体群规模较小, ②号矿体群规模较大。

②号矿体群具有 NE 向侧伏和 SE 向倾伏趋势, 倾伏向 137°, 侧伏角约 40°, 沿倾伏和侧伏方向具有分段富集的特征 (图 5), 控矿断裂沿走向和倾向波状起伏, 控制了矿体的分段富集 (图 4)。即 58~34 号勘探线之间矿体平均厚度×平均品位值较高, 反映矿化富集程度较强; 34~26 号勘探线之间矿体平均厚度×平均品位值较低, 反映矿化富集程度较弱; 26~10 号勘探线之间矿体平均厚度×平均品位值较高, 反映矿化富集程度较强; 10~5 号勘探线之间矿体平均厚度×平均品位值较低, 反映矿化富集程度

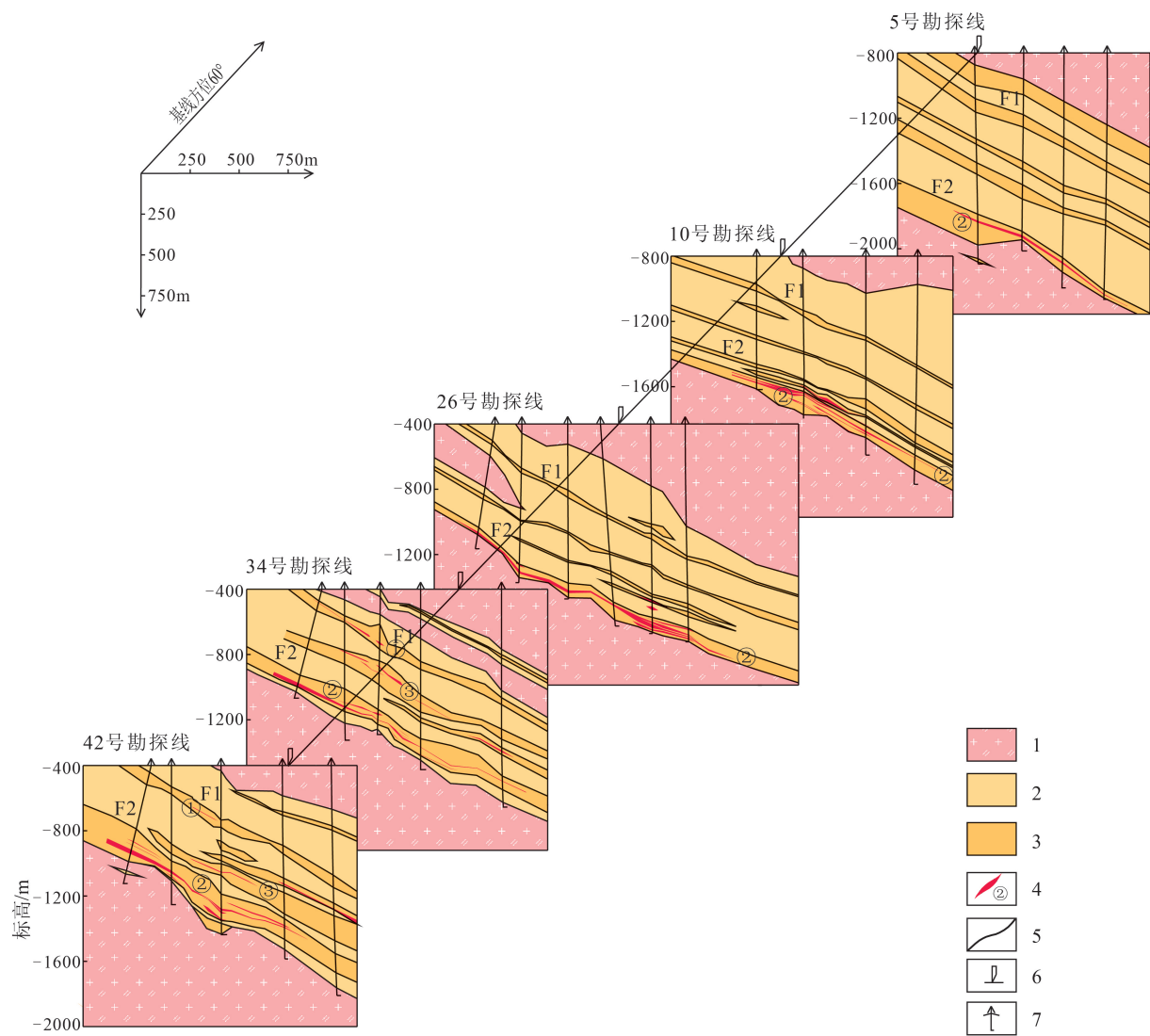


图 4 水旺庄金矿床联合勘探线(42、34、26、10 和 5 号)剖面图

Fig. 4 Section map of No.42,34,26,10 and 5 exploration lines of the Shuiwangzhuang gold deposit

1—晚侏罗世玲珑花岗岩;2—(黄铁)绢英岩化花岗岩;3—(黄铁)绢英岩化花岗质碎裂岩;4—金矿体及编号;
5—地质界线;6—基点位置;7—钻孔位置

较弱。矿体沿勘探线方向的倾斜长度、平均厚度、平均品位及平均厚度×平均品位表现为与矿化富集程度相同的变化趋势,由矿化富集程度较强的 42 号勘探线至矿化富集程度较弱的 34 号勘探线,矿体倾斜长度、平均厚度、平均品位及平均厚度×平均品位均降低;由矿化富集程度较弱的 34 号勘探线至矿化富集程度较强的 26 号勘探线,除平均品位略有降低外,矿体倾斜长度、平均厚度及平均厚度×平均品位均升高;由矿化富集程度较强的 10 号勘探线至矿化富集程度较弱的 5 号勘探线,矿体倾斜长度、平均厚

度、平均品位及平均厚度×平均品位均显著降低(表 1)。

3 深部成矿预测及钻探验证

3.1 深部找矿前景

水旺庄金矿床的最大勘查深度达-2200 m 标高,受探矿权范围的影响,其深部未开展勘查工作。矿床深部是否还有矿是值得进一步探索的问题,这一问题的解决对整个胶西北 3000 m 深度的深部找矿具有示范意义。

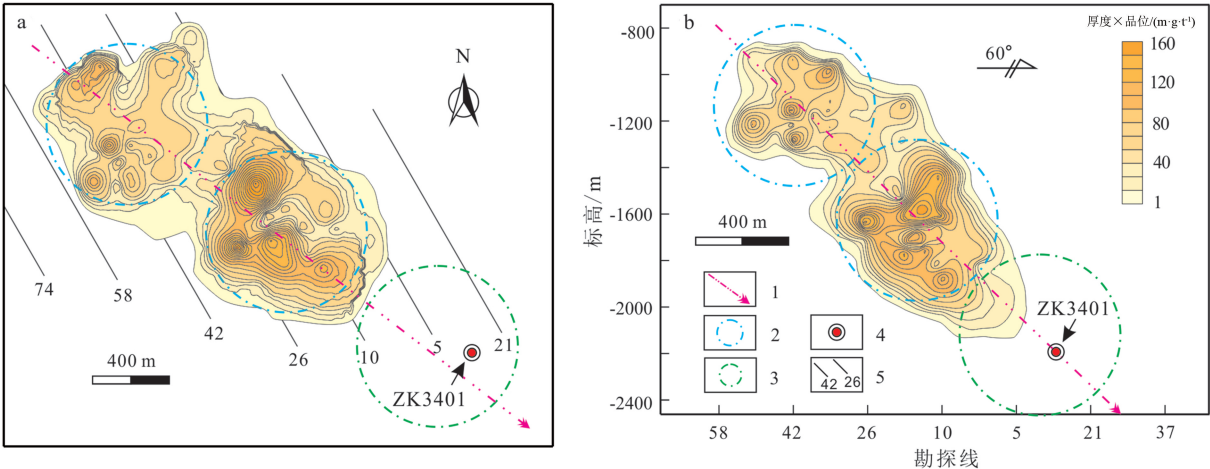


图 5 水旺庄金矿床②号矿体矿化富集规律

Fig. 5 Horizontal projection (a) and vertical projection (b) of the No.2 orebody, showing the mineralization enrichment regularities along the lateral trending and plunging direction

a—水平投影;b—垂直投影;1—矿体倾伏/侧伏趋势;2—已探明富矿段位置;3—深部预测富矿段位置;4—深部验证钻孔;5—勘探线及编号

3.1.1 矿化富集规律指示的深部找矿前景

上述矿床矿化富集规律的研究表明,金矿体和矿化富集区具有明显的倾伏和侧伏规律,而且具有分段富集特征(图 5)。已控制金矿体分布范围出现 2 个矿化富集区,2 个矿化富集区之间为弱矿化段。此外,矿体沿倾伏和侧伏方向向深部未封闭,目前已控制矿体的边部平均厚度 2.06 m,平均品位 2.37 g/t,是明显的矿化富集程度较低区域。这种矿化富集规律指示,矿体沿倾伏和侧伏方向向深部仍有较大的延伸,预测 5 号勘探线以东和-2200 m 以深可能出现另一个矿化富集程度较强的区域(图 5),该区域具有良好的找矿前景。

3.1.2 地球物理探测指示的深部找矿前景

区内东风金矿床 50ZK1 钻孔激电测井显示,全孔视电阻率 ρ_s 整体较低,变化范围为 325~11479 $\Omega \cdot m$,

平均 4497 $\Omega \cdot m$,视极化率 η 变化范围为 0.50%~8.95%,平均 2.86%。该孔于 1275.02~1300.05 m 控制 25.03 m 的黄铁绢英岩化蚀变带。其中,1275.02~1292.65 m 岩性为黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩,矿化较强,主要金属矿物为黄铁矿,呈星点状和团块状产出;1292.65~1300.05 m 为黄铁绢英岩化花岗岩,矿化较弱,局部可见团块状、细脉状、星点状黄铁矿。1278.20~1296.65 m 控制连续金矿化,Au 品位变化范围为 0.08~1.35 g/t,平均 0.84 g/t。1275.00~1310.00 m 激电异常特征明显,该段视电阻率 ρ_s 变化范围为 3958~8837 $\Omega \cdot m$,平均 6255 $\Omega \cdot m$,较全孔的平均视电阻率略高,但较上下两侧明显降低,视电阻率 ρ_s 约为 4000 $\Omega \cdot m$,视电阻率 ρ_s 曲线呈规则的平滑波谷状(图 6)。视极化率 η 变化范围为 2.53%~8.95%,平均 5.60%,明显高于全孔平均值,视极化率 η 曲线呈规则的平滑波峰状(图 6)。整体看,低视电阻率 ρ_s 和高视极化率 η 区段与蚀变矿化位置对应较好(图 6)。蚀变矿化带呈现低视电阻率 ρ_s 的原因是,此类型金矿严格受控于断裂构造,而断裂碎裂带易充水呈现低阻特征。高视极化率 η 的原因是,此类型金矿的主要载金矿物为黄铁矿,其金属离子与自由电子含量较高,具备良好的激发极化效应,呈现出高视极化率特征。

沿水旺庄金矿床矿体侧伏方向,距目前矿体控制边界 1 km 处(相当于 67 号勘探线),实测了一条

表 1 水旺庄金矿床典型勘探线矿体特征

Table 1 Main orebody characteristics of typical exploration lines in the Shuiwangzhuang gold deposit

勘探 线号	矿体长度 /m	厚度 /m	品位 /(g·t ⁻¹)	厚度×品位 /(m·g·t ⁻¹)	矿化富 集程度
42 线	2006	8.88	3.67	32.61	强
34 线	1732	5.99	3.46	20.79	弱
26 线	1950	10.50	3.33	35.03	强
10 线	1410	13.10	4.78	62.75	强
5 线	1227	2.06	2.37	4.89	弱

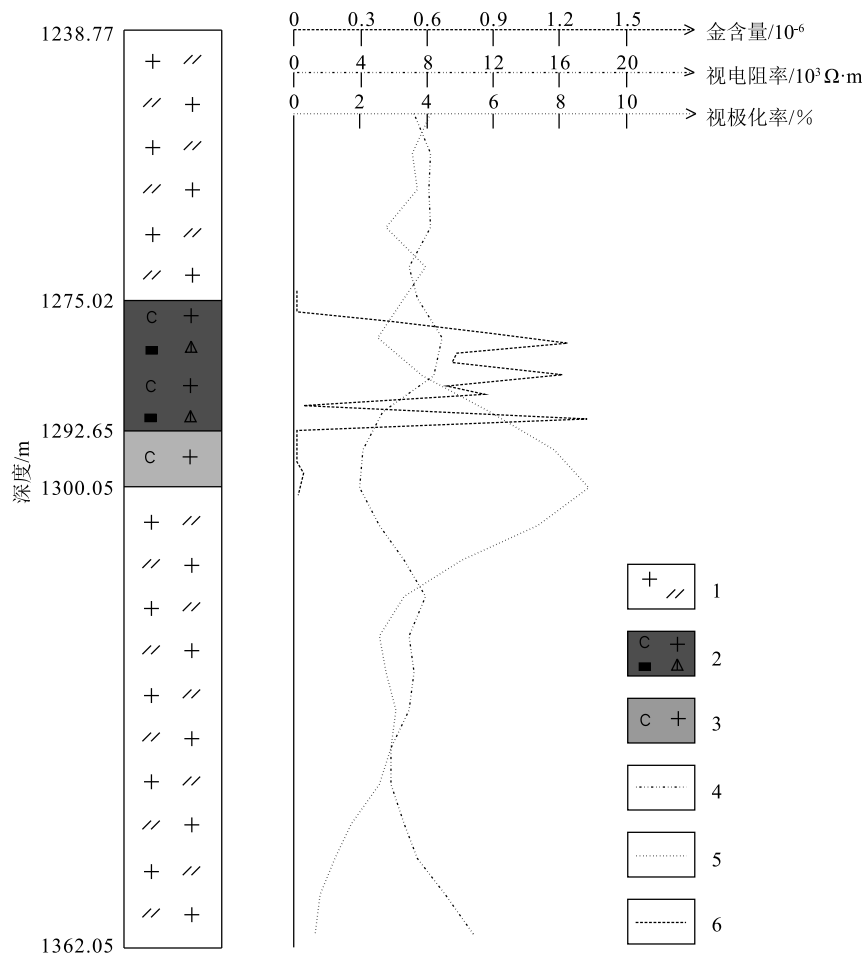


图 6 玲珑金矿田东风金矿床 50ZK1 钻孔柱状图及激电测井曲线

Fig. 6 Schematic lithostratigraphic column and curve of gold grade, apparent resistivity, polarizability of drill hole 50ZK1, Dongfeng gold deposit, Linglong gold field

1—晚侏罗世玲珑型花岗岩;2—黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩;3—黄铁绢英岩化花岗岩;4—视电阻率曲线;5—视极化率曲线;6—金品位曲线

由 325°至 145°方向长约 8.5 km 的大地电磁测深 (MT)剖面(图 2 中 L01),点号 1500~10000。视电阻率等值线断面图反映,浅部视电阻率值较低且稳定,深部视电阻率值较高,呈现中高阻特征。在深部的中高阻区和浅部的低阻区接触部位,存在明显的条带状视电阻率梯度带,倾向 SE,倾角约 25°(图 7)。以往地球物理资料显示,胶东群变质岩系和新太古代 TTG 电阻率值低且变化范围较小,即较稳定。而玲珑花岗岩、郭家岭花岗岩等中生代岩浆岩电阻率值较高且变化范围较大,电性不均匀。结合水旺庄矿区内地表岩石出露情况,推断深部的中高阻区域为晚侏罗世玲珑花岗岩,浅部的低阻区域主体为新太古代 TTG 和胶东群变质岩系,二者之间的视电阻率梯度带是招平断裂带的反映。而且招平断裂带向深部延伸稳定,沿倾向具有波状起伏的

特征,整体表现为浅部倾角较陡,向深部倾角变缓,呈阶梯式展布。以往对胶东地区断裂控矿规律的研究表明,断裂倾角变缓部位是成矿有利区段^[28-29]。本次大地电磁测深指示招平断裂带在 -2500~-3000 m 标高产状变缓,倾角由 27°变为 18°,预测该区段找矿前景良好。

3.2 3000 m 深孔验证结果

为确定深部预测效果,在预测的深部靶区实施了 ZK3401 钻孔进行试验验证。验证孔终孔深 3000.58 m。钻孔于 1044.76 m 深度揭露到栾家河断裂碎裂岩带,倾角为 80°,证实栾家河断裂总体倾角较陡。于 2007.00~2057.00 m 揭露破头青断裂带主裂面,岩性主要为绢英岩化花岗质碎裂岩,发育 50 m 厚的连续黄铁矿化,黄铁矿呈团块状、细脉状产出(图 8-a),Au 品位 0.13~3.64 g/t,平均 0.39 g/t;

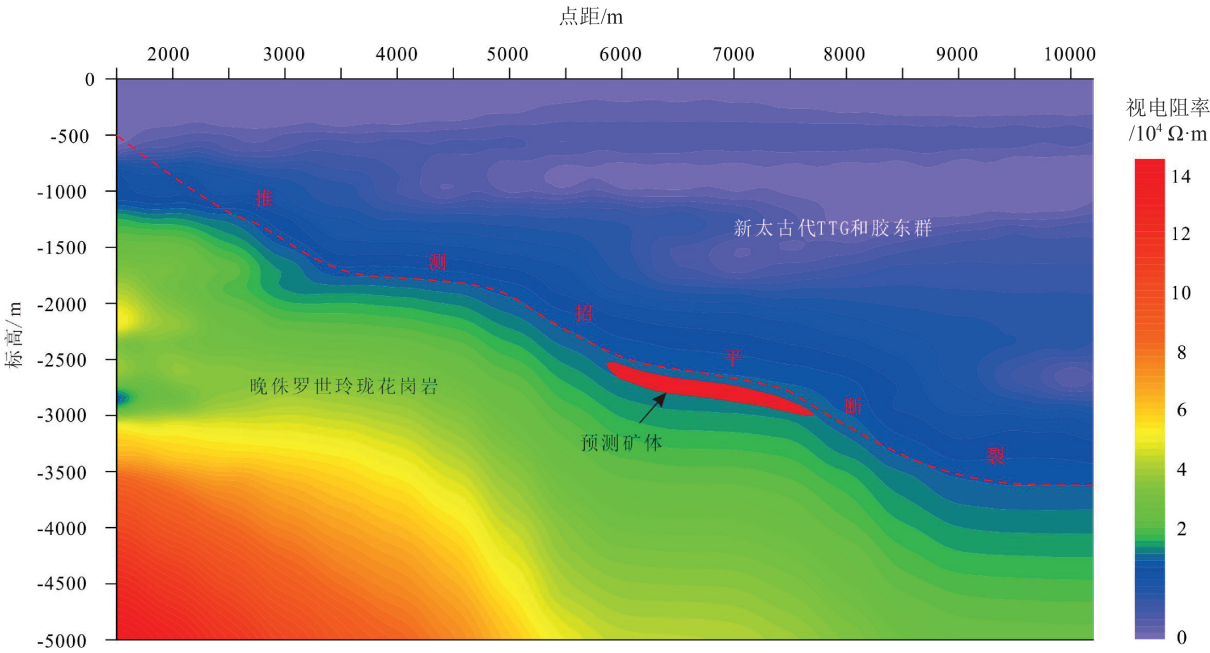


图 7 水旺庄金矿床 L01 大地电磁测深(MT)反演剖面
Fig. 7 MT profile of L01 in the Shuiwangzhuang gold deposit

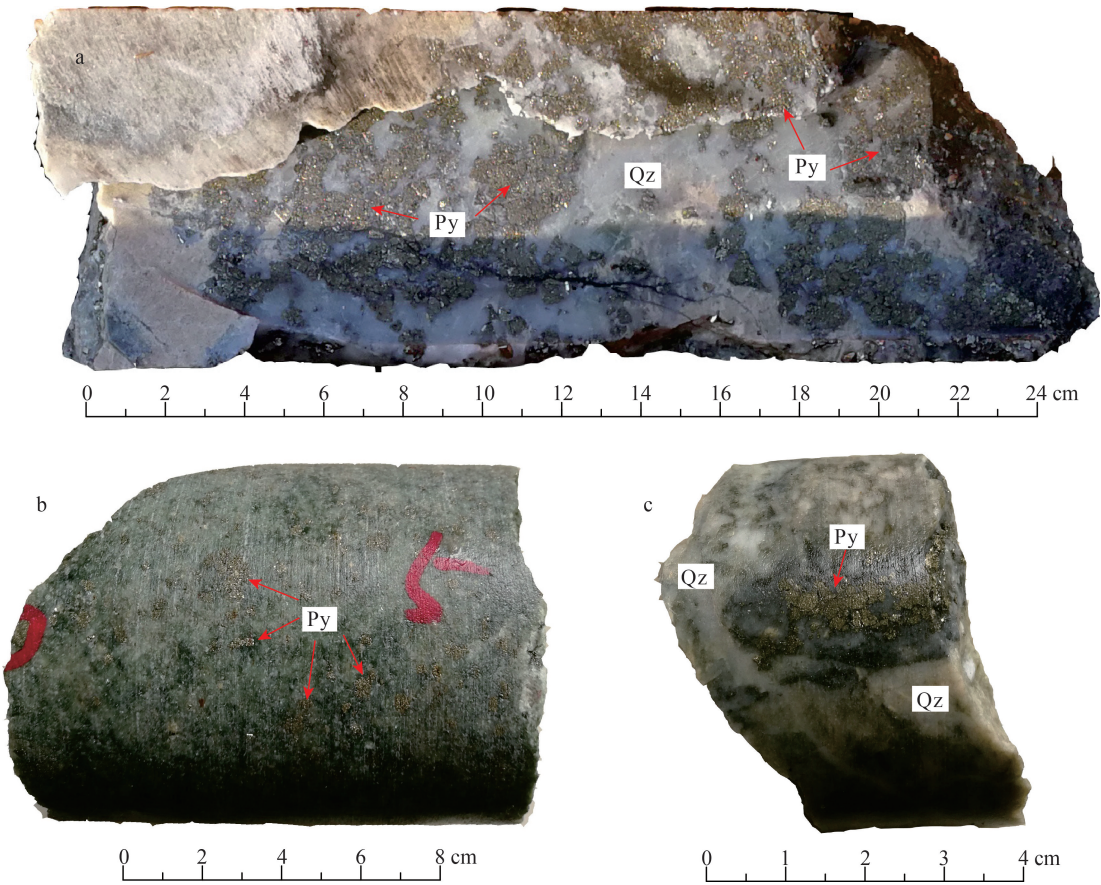


图 8 水旺庄 ZK3401 典型矿化现象

Fig. 8 Typical ores of ZK3401 in the Shuiwangzhuang gold deposit
a—破头青断裂控制矿化;b—九曲—蒋家断裂控制矿化;c—2831.15~2832.65 m 矿化;Qz—石英;Py—黄铁矿

于 2144.70~2162.00 m 控制九曲-蒋家断裂带,岩性为绢英岩化花岗质碎裂岩,黄铁矿呈星点状、小团块状产出(图 8-b),Au 品位 0.12~0.74 g/t,平均 0.23 g/t;于 2831.15~2832.65 m 发现 1.50 m 厚的黄铁矿化,矿化强度高,局部黄铁矿含量可达 90%,呈大团块状(图 8-c),Au 品位达 6.85 g/t。该钻孔验证了深部预测的可靠性,指示了深部良好的找矿前景。

4 讨 论

成矿预测是一项复杂的系统工程,胶东地区已开展过多次金矿成矿预测,预测结果不断变化。20 世纪末,预测胶东金资源量在 1000 t 左右;21 世纪初完成的胶东地区金矿综合信息成矿预测,预测金资源总量 3026 t^[30];之后开展的山东省重要矿产资源潜力预测评价,预测胶东地区 2000 m 以浅金资源量 3963 t;随着近年深部找矿取得重大突破,有研究预测,胶东 3000 m 深度以浅金资源量不少于 6000 t,5000 m 深度以浅金资源量将超过 10000 t^[31]。本文对水旺庄金矿床 3000 m 深度的预测评价和钻探验证,指示了这一区域的良好找矿前景。胶西北三山岛断裂、焦家断裂与招平断裂具有高度一致的成矿特征,说明胶西北地区深部找矿潜力非常可观。

对胶西北地区金矿成矿深度与成矿后的剥蚀程度分析可以大致推断深部找矿前景。近年来,许多研究者通过流体包裹体研究,讨论了金的成矿深度。如招远大尹格庄金矿成矿压力为 127~276 MPa,成矿深度为 9.2~14.0 km^[32];招远谢家沟金矿成矿压力为 191~302 MPa,成矿深度为 7.2~9.7 km^[33];招远夏甸金矿成矿压力为 88~339 MPa,成矿深度为 8.8~12.6 km^[34];招远玲珑金矿成矿压力为 54~242 MPa,深度为 5.4~9.0 km^[35]。水旺庄金矿床流体包裹体研究表明,其成矿温度为 200~380 °C,成矿压力为 60~180 MPa^[36-37]。取岩石(矿体上盘花岗岩类)平均密度为 2.7 g/cm³,静岩压力为 27 MPa/km,分别按照静水压力、静岩压力和不同压力条件下的深度计算回归方程^[38],得出水旺庄金矿床成矿深度范围为 2.2~18 km(表 2)。因为成矿过程体系处于静水压力和静岩压力的交替转换状态,成矿深度应介于静水压力估算深度和静岩压力估算深度之间,由此估算该矿床成矿深度为 4.4~12 km。

表 2 水旺庄金矿床流体包裹体捕获压力与成矿深度估算
Table 2 Metallogenic depth calculated from the capture pressure of the fluid inclusions in the Shuiwangzhuang gold deposit

	捕获压力 /MPa	静水压力 估算深度 /km	静岩压力 估算深度 /km	回归方程 估算深度 /km
最小值	60	6	2.2	6
最大值	180	18	6.7	11
平均值	120	12	4.4	8.5

矿床形成后的抬升剥蚀程度是影响深部找矿前景评价的关键因素之一。由于区内金矿与中生代花岗岩密切相关,对中生代花岗岩抬升剥蚀情况的研究可以指示金成矿后的剥蚀和保存情况。张华峰等^[39]利用花岗岩中岩浆绿帘石压力计方法估算玲珑花岗岩 110 Ma 以来隆升剥蚀量不足 4 km。王建平等^[40]利用黑云母压力计法估算郭家岭花岗岩平均隆升剥蚀量约为 4.52 km,艾山岩体(115 Ma)平均隆升剥蚀量约为 2.37 km。柳振江等^[41]通过磷灰石裂变径迹热年代学测试获得玲珑花岗岩 110 Ma 以来的剥蚀量为 2.0~4.2 km,平均约 3.3 ± 0.5 km。上述研究成果表明,胶东地区成矿后地壳隆升剥蚀厚度不超过 4.5 km。对比流体包裹体测试估算的成矿深度和隆升剥蚀程度的研究结果认为,胶东金矿成矿后矿体的剥蚀量很小,胶东尤其是胶西北深部找矿潜力巨大。

对胶西北主要控矿断裂展布特征及金矿体赋存规律的研究表明,断裂构造由浅部至深部呈阶梯式分布^[28-29],金矿体沿倾向构成多个矿化富集带,其中招平断裂带北段累计查明金资源量 700 t。已探明的第一矿化富集带位于-600 m 标高以浅,查明金资源量 165 t;第二矿化富集带位于-600~-2000 m 标高,查明金资源量 535 t。根据本文对-3000 m 深度的找矿前景分析,预计在-2000~-3000 m 深度存在第三矿化富集带。基于第一矿化富集带和第二矿化富集带数据,采用体含矿率法预测同一区域-2000~-3000 m 深度第三矿化富集带的金资源量为 344~399 t(图 9),如果按照由第一矿化富集带向第二矿化富集带金资源量明显变大的趋势推测,第三矿化富集带的金资源量可能超 400 t。

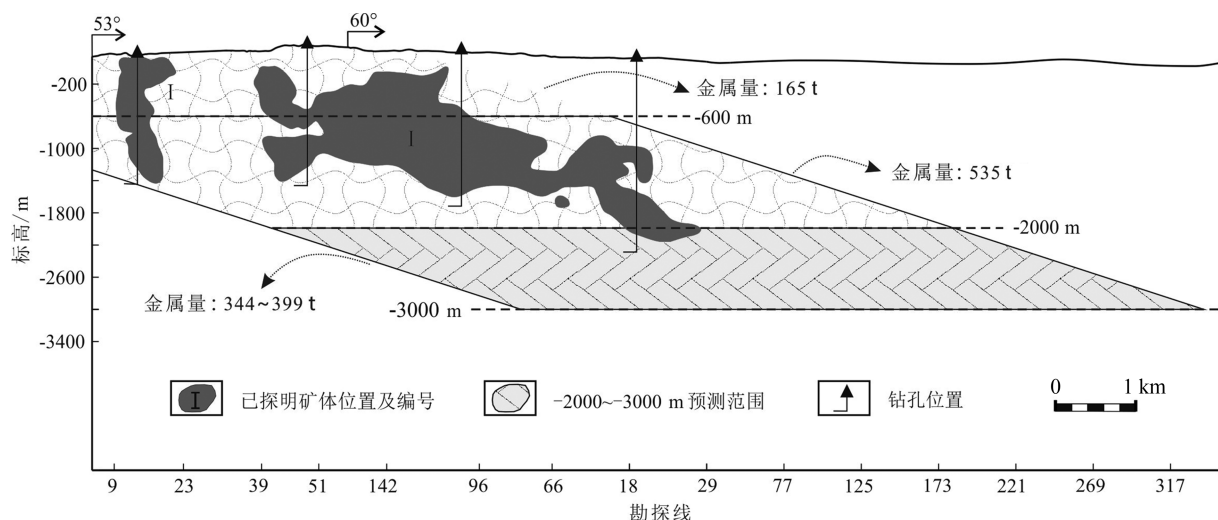


图9 招平断裂带北段深部金资源量预测示意图

Fig. 9 Schematic diagram of deep gold resources prediction in northern Zhaoping fault system

5 结论

(1) 水旺庄金矿床主要矿体空间分布及形态严格受控于 NE 走向、SE 倾向的招平断裂带, 主要矿体具有明显的 NE 向侧伏和 SE 向倾伏趋势, 沿侧伏和倾伏方向具有分段富集的特征。

(2) 沿水旺庄金矿床矿体侧伏方向招平断裂带向深部延伸稳定, 沿倾向具有波状起伏的特征, 整体表现为浅部倾角较陡, 向深部倾角变缓, 呈阶梯式展布, -2500~-3000 m 标高产状变缓, 该区段找矿前景良好。

(3) 3000.58 m 钻孔于 2007.00~2057.00 m 揭露破头青断裂带, 于 2144.70~2162.00 m 控制九曲-蒋家断裂带, 于 2831.15~2832.65 m 深度探获厚 1.50 m、Au 品位达 6.85 g/t 的金矿体, 验证了深部成矿预测的可靠性, 指示深部良好的找矿前景。

(4) 水旺庄金矿床深部预测结果、区域成矿深度与剥蚀程度分析、胶西北断裂赋矿规律等均表明, 招平断裂带北段深部找矿潜力巨大, 初步预测在 -2000~-3000 m 深度存在第三矿化富集带, 预测金资源量可能超 400 t。

致谢: 成文过程中得到了山东省地质矿产勘查开发局首席专家宋明春研究员的指导, 两位审稿专家提出了宝贵的修改意见, 在此一并致以诚挚的感谢。

参考文献

[1] 宋明春. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展[J]. 地

质通报, 2015, 34(9): 1758-1771.

[2] 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 等. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(4): 406-422.

[3] 宋明春, 徐军祥, 焦秀美, 等. 山东省地质矿产勘查开发局 60 年重要找矿成果和深部隐伏区找矿技术进展[J]. 山东国土资源, 2018, 34(10): 1-14.

[4] 于学峰, 李大鹏, 田京祥, 等. 山东金矿深部勘查进展与成矿理论创新[J]. 山东国土资源, 2018, 34(5): 1-13.

[5] 鲍中义, 孙忠全, 刘国栋, 等. 破头青断裂水旺庄矿区矿床地质特征及找矿方向[J]. 山东国土资源, 2014, 30(2): 29-33.

[6] 刘国栋, 温桂军, 刘彩杰, 等. 招平断裂北段水旺庄深部超大型金矿床的发现、特征和找矿方向[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(3): 38-45.

[7] 刘国栋, 李娟. 胶东招平断裂-2200m 特大型金矿体地质特征与找矿标志[J]. 山东国土资源, 2019, 35(1): 4-10.

[8] 刘国栋, 宋国政, 鲍中义, 等. 胶东招平断裂北段深部找矿新突破及对断裂空间展布的新认识[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(2): 226-234.

[9] 刘日富, 周鑫, 吕雨璐, 等. 胶东三山岛-仓上断裂带控矿规律与找矿勘查实践[J]. 地质与勘探, 2019, 55(2): 528-541.

[10] 宋国政, 李山, 闫春明, 等. 焦家金矿田 I 号主矿体地质特征及找矿方向[J]. 地质与勘探, 2018, 54(2): 219-229.

[11] Yang L Q, Guo L N, Wang Z L, et al. Timing and mechanism of gold mineralization at the Wang' ershan gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 88: 491-510.

[12] 刘向东, 邓军, 张良, 等. 胶西北寺庄金矿床热液蚀变作用[J]. 岩石学报, 2019, 35(5): 1551-1565.

[13] 丁正江, 孙丰月, 刘福来, 等. 胶东中生代动力学演化及主要金属矿床成矿系列[J]. 岩石学报, 2015, 31(10): 3045-3080.

[14] 曲晓明, 王鹤年, 饶冰. 胶东群部分熔体实验及其对花岗岩成因的指示[J]. 地球化学, 2000, 29(2): 153-161.

[15] 刘平华, 刘福来, 王舫, 等. 山东半岛荆山群富铝片麻岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(5): 829-843.

[16] 谢士稳, 王世进, 颜强, 等. 华北克拉通胶东地区粉子山群碎屑

- 锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 岩石学报, 2014, 30(10): 2989-2998.
- [17] 朱光, 徐嘉炜, Flether C J N, 等. 应用 X 射线衍射分析胶北蓬莱群板岩中的变质作用[J]. 地质与勘探, 1994, 30(2): 42-49.
- [18] 初航, 陆松年, 王慧初, 等. 山东长岛地区蓬莱群辅子弁组碎屑锆石年龄谱研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1017-1028.
- [19] Ma L, Jiang S Y, Dai B Z, et al. Multiple sources for the origin of Late Jurassic Linglong adakitic granite in the Shandong Peninsula, eastern China: Zircon U-Pb geochronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. Lithos, 2013, 162/163: 251-263.
- [20] Yang L Q, Dilek Y, Wang Z L, et al. Late Jurassic, high Ba-Sr Linglong granites in the Jiaodong Peninsula, East China: Lower crustal melting products in the eastern North China Craton[J]. Geological Magazine, 2018, 155(5): 1040-1062.
- [21] 耿科, 王瑞江, 李洪奎, 等. 胶西北丛家花岗闪长岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 地球学报, 2016, 37(1): 90-100.
- [22] Goss C S, Wilde A S, Wu F Y, et al. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton[J]. Lithos, 2010, 120(3/4): 309-326.
- [23] 杨宽, 王建平, 林进展, 等. 胶东半岛艾山岩体岩石地球化学特征及成因意义[J]. 地质与勘探, 2012, 48(4): 693-703.
- [24] 刘利双, 刘福来, 冀磊, 等. 北鲁超高压变质带内多成因类型的变花岗质岩石及其地质意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(6): 1557-1580.
- [25] Deng J, Wang Q F. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework[J]. Gondwana Research, 2016, 36: 219-274.
- [26] 杨立强, 邓军, 王中亮, 等. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2447-2467.
- [27] Yang L Q, Deng J, Guo L N, et al. Origin and evolution of ore fluid, and gold-deposition processes at the giant Taishang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 585-602.
- [28] 宋明春, 伊丕厚, 徐军祥, 等. 胶西北金矿阶梯式成矿模式[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(7): 992-1000.
- [29] 宋明春, 林少一, 杨立强, 等. 胶东金矿成矿模式[J]. 矿床地质, 2020, 39(2): 215-236.
- [30] 李士先, 刘长春, 安郁宏, 等. 胶东金矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 325-400.
- [31] 宋英昕, 宋明春, 丁正江, 等. 胶东金矿集区深部找矿重要进展及成矿特征[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(3): 4-18.
- [32] Chai P, Zhang H R, Dong L L, et al. Geology and ore-forming fluids of the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: Implications for mineral exploration[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, 204: 224-239.
- [33] Chai P, Hou Z Q, Zhang H R, et al. Geology, Fluid Inclusion, and H-O-S-Pb Isotope Constraints on the Mineralization of the Xiejiagou Gold Deposit in the Jiaodong Peninsula[J]. Geofluids, 2019, 2019: 1-23.
- [34] Chai P, Hou Z Q, Zhang Z Y. Geology, Fluid Inclusion and Stable Isotope Constraints on the Fluid Evolution and Resource Potential of the Xiadian Gold Deposit, Jiaodong Peninsula[J]. Resource Geology, 2017, 67(3): 341-359.
- [35] Guo L N, Deng J, Yang L Q, et al. Gold deposition and resource potential of the Linglong gold deposit, Jiaodong Peninsula: Geochemical comparison of ore fluids[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 120: 1-17.
- [36] 万多. 山东胶东地区招平断裂带北段金矿成矿规律与成矿预测[D]. 吉林大学博士学位论文, 2014.
- [37] 张义东. 胶东水旺庄金矿床深部地质特征及成因机制研究[D]. 河北地质大学硕士学位论文, 2018.
- [38] 孙丰月, 金巍, 李碧乐. 关于脉状热液金矿床成矿深度的思考[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(S1): 27-29.
- [39] 张华锋, 李胜荣, 翟明国, 等. 胶东半岛早白垩世地壳隆升剥蚀及其动力学意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(2): 285-295.
- [40] 王建平, 刘俊, 刘家军, 等. 黑云母全铝压力计估算胶东西北部玲珑花岗质杂岩剥蚀程度[J]. 矿物学报, 2009, 29(S1): 481-482.
- [41] 柳振江, 王建平, 郑德文, 等. 胶东西北部金矿剥蚀程度及找矿潜力和方向——来自磷灰石裂变径迹热年代学的证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(12): 3597-3611.