

甘肃北山地区 460 金矿床植物地球化学异常形成的地学机制

宋慈安^{1,2}, 宋 玮³, 丁汝福⁴, 雷良奇^{1,2}

(1. 桂林理工大学 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004; 3. 广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006; 4. 北京矿产地质研究院, 北京 100145)

摘 要:为探讨旱区荒漠植物地球化学异常形成的地学机制,选择甘肃北山地区 460 金矿床作为研究对象,进行了从基岩(矿)→覆盖层→植物的系统采样和多项目试验研究。结果表明:旱区荒漠覆盖条件下,金矿床地下水和土壤水携带的各种可溶性成分和成矿-伴生元素在外界潜在蒸发力、含水量及其变化梯度和植物吸收蒸腾等驱动力的作用下垂直向上运移;在垂向上,K、Na、Cl、Ca 等元素淀积在上部,Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Mo 等成矿-伴生元素淀积在下部;在横向上,矿体及其上部覆盖层形成的相对氧化酸性环境形成了 Au、Ag、Cu、Zn、As、Sb、Mo 等元素相对高含量区,两侧基岩及其上部覆盖层形成的相对还原碱性环境形成了 K、Na、Cl、Ca、Mg、Mn 等元素相对高含量区;生长在矿体上部的植物吸收了较多的 Au、Ag、Cu、As、Mo 等元素,形成了植物地球化学异常;由于不同根深的植物吸取水分及元素的深度和基质类型不同,所以它们吸收的元素组合及含量也不相同;旱区荒漠覆盖条件下,植物地球化学异常的形成主要与地下水和土壤水将下部成矿-伴生元素搬运到上部植物根系所能达到的部位有关;不同根深的植物产生的地球化学异常元素组合、强度等特征具有一定的差异。

关键词:植物地球化学异常;金矿床;红沙;梭梭;地学机制;水盐运移;荒漠;甘肃

中图分类号:P593

文献标志码:A

Formation Geo-mechanism of Botanogeochemical Anomaly of 460 Au Deposit in Beishan Area of Gansu

SONG Ci-an^{1,2}, SONG Wei³, DING Ru-fu⁴, LEI Liang-qi^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 3. School of Computers, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China; 4. Beijing Research Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100145, China)

Abstract: In order to understand the formation geo-mechanism of botanogeochemical anomaly in arid desert, the samples were collected from bedrock (ore), cover and plants of 460 Au deposit in Beishan area of Gansu, and the contents of water, pH and Eh values, element contents were measured, and the formation geo-mechanism model was built. The results show that a variety of soluble components, ore-forming and associated elements carried by groundwater and soil water move upward vertically by the action of driving forces including the external potential

收稿日期:2016-09-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41363003,40972220)

作者简介:宋慈安(1948-),男,土家族,湖南慈利人,教授,E-mail:gl dysca@126.com。

evaporation, water content and its gradient, and absorption and transpiration of plants in Au deposit covered by arid desert; K, Na, Cl and Ca are vertically rich in the upper part, and the ore-forming and associated elements (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, As, Sb and Mo, etc.) are vertically rich in the lower part; laterally, the ore body and its upper covering layers, which are relative oxydic and acidic, are relatively high content areas of Au, Ag, Cu, Zn, As, Sb and Mo, but the bilateral bedrock and its upper covering layers, which are relative reductive and alkaline, are relatively high content areas of K, Na, Cl, Ca, Mg and Mn; the plants in the upper part of the ore body absorb more elements (Au, Ag, Cu, As and Mo, etc.), and the botanogeochemical anomaly is formed; the depths and matrix types of elements and water absorbed by plants with different depths of roots are not the same, so that the element association and contents absorbed by plants are different; the formation of botanogeochemical anomaly in arid desert is mainly related with the underground and soil waters which transport ore-forming and associated elements from the lower part to the upper part, so that the root of plant can absorb the elements; the element combination and strength of geochemical anomaly in the plants with different depths of root are different.

Key words: botanogeochemical anomaly; Au deposit; *Reaumuria soongrica*; *Haloxylon ammodendron*; geo-mechanism; water-salt transport; desert; Gansu

0 引言

利用植物地球化学在旱区荒漠寻找隐伏矿已在世界许多国家和地区得到应用并取得积极成效。澳大利亚西部、北部旱区利用一种耐干耐盐的灌木找金,异常反映的矿体深度可达40 m,还能反映深部矿体的形态和规模大小^[1-4]。南美洲玻利维亚和阿根廷安第斯山脉高原旱区应用的一种作为植物化探的“Thola”灌木找矿效果极为显著^[5-7]。北美洲美国西南和墨西哥沙漠,非洲摩洛哥、埃及到撒哈拉沙漠以及博茨瓦纳、尼日尔等旱区也开展了许多植物化探研究,至少总结出这些旱区35种以上的找矿有效植物^[8-12]。中国新疆、甘肃、青海、内蒙古等荒漠区也开展过少量植物找矿试验:铅锌矿区植物中Pb异常能准确指示铅锌矿位置;铜矿区植物中Cu异常可以反映埋深20~500 m的盲矿体;金矿区植物中Au异常可以反映70 m深处的金矿信息^[13-22]。国内外实践说明,在旱区荒漠应用植物化探找矿是一种有效可行的方法。但是直到现在,旱区荒漠植物化探依然没有成为国内外化探的主流方法。在中国荒漠区的化探普查主要是应用地表岩屑化探,植物化探仅有极少数的试验工作。究其原因,客观上可能是因为该方法比岩屑化探复杂,同时从技术理论上来说,对荒漠区植物地球化学异常的形成机理、找矿深度等理论模型的研究基本上还属于“空白”,这在一定程度上影响了对植物地球化学异常的科学

解释和评价,使得植物化探方法难以得到广泛的推广应用。本文选择甘肃北山荒漠区460金矿床作为试验场所,在已发现矿床上植物地球化学异常的基础上,通过浅井开展从基岩(矿)→覆盖层→植物系统采样及多项目测试工程,以荒漠特殊水热条件、剖面土壤地质-物化特征研究为背景,重点研究荒漠-植物系统元素的分布分配与迁移转化,剖析植物地球化学异常形成的地学原因和条件,旨在从理论上探讨干旱荒漠景观植物地球化学异常形成的地学机制。

1 区域地质概况

1.1 地貌特征

460金矿床位于甘肃省肃北县马鬃山镇境内,北山地区西北部,属典型大陆性温带干旱气候,降水量小,蒸发量大,干燥多风,冬季严寒,夏季酷热,昼夜温差大。该区年降水量不到75 mm,而潜在年蒸发量大于2 300 mm^[23-25]。该区属山前平原荒漠戈壁及残山丘陵地貌,海拔高度约1 800 m,比高为5~50 m。区内无常年性地表溪流,只有夏季暴雨短暂性洪水冲刷形成的沙沟。荒漠戈壁广泛分布第四系松散堆积覆盖物,主要由风积沙土和冲、洪积砂砾组成,呈半松散—半胶结状。风积沙土一般为砂-泥质;冲、洪积砂砾从细砂到砾石(粒径为10~20 cm)均有,呈次棱角状。覆盖物厚度为0.5~30.0 m,一般厚度为2~5 m。第四系覆盖物下的基岩风化强烈,残

积及风化层厚度为 0.5~15.0 m, 裂隙极为发育。地下水为第四纪堆积孔隙水和基岩裂隙潜水, 地下水位深一般为 3~6 m, 最浅为 0.5~2.0 m, 最深大于 50 m。深部基岩断裂破碎裂隙发育时, 则与其上第四系孔隙水、基岩裂隙潜水发生水力联系, 可形成构造含水体系。土壤类型主要有灰棕漠土、含砂砾灰漠土、山地灰棕漠土及盐土, pH 值为 7.5~9.5, 其多为碱性土, 有机质含量低^[25-26]。

该区自然植被是以温带半灌木和荒漠灌木为主^[20]。占优势的植物群落为红沙(*Reaumuria soongrica*), 次为梭梭(*Haloxyylon ammodendron*)。伴生植物有霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)、膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)、小白果刺(*Nitraria sibirica*)、合头草(*Sympegma regelii*)、木本猪毛菜(*Salsola arbuscula*)、松叶猪毛菜(*Salsola laricifolia*)、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa Maxim*)、细枝盐爪爪(*Kalidium gracile*)、白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus Moq.*)等。植物总覆盖度为 15%~20%。红沙属柽柳科红沙属, 为半灌木, 垂直根深可超过 2 m; 梭梭属藜科梭梭属, 为小乔木, 垂直根深可超过 4 m。二者均为典型的旱生植物, 耐旱、耐盐、耐碱、耐贫瘠^[27-29]。

1.2 地质背景

460 金矿床大地构造位置处于西伯利亚板块与哈萨克斯坦板块碰撞形成的板块缝合线上, 紧邻红石山—黑鹰山地体。地层主要为下石炭统白山组中酸性变质火山岩及碎屑沉积岩。岩浆岩主要为花岗闪长岩, 呈岩基、岩株状产出。构造以近 NW 向断裂为主, 为矿区的主要控矿容矿构造。含金石英脉主要产于花岗闪长岩内接触带及外接触带变质岩的断裂或裂隙中; 单脉长 200~400 m, 最长 900 m; 厚 0.4~1.0 m, 最厚 3.5 m; 倾向 NNE 或 SSW, 倾角 70°~80°, 局部近直立。矿石矿物组合主要为黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿及石英、长石、绿泥石、绢云母等; Au 以自然金及斜方碲金矿、针碲金银矿等碲化物的形式存在。矿石构造有细脉状—网脉状及条带状、团块状等; 结构有半自形—他形结构、填隙结构、网状结构等。围岩蚀变有硅化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化等。成矿阶段可划分为石英—黄铁矿阶段、石英—多金属硫化物阶段和石英—碳酸盐阶段。该矿床属于浅成低温热液型金矿床^[30-32]。矿区中变质火山岩、碎屑岩及花岗闪长岩等岩石的 Au、Ag 含量较高, 平均含量(质量分数, 下同)分别为 142×10^{-9} 和 1.41×10^{-6} , 是区域背景

相应岩石平均含量的 157.8 倍和 10.1 倍。

2 试验方法

2.1 试验地段选择

在已发现矿床植物地球化学异常的基础上, 选择具有一定厚度的第四系覆盖、地表植被较发育且已被工程证实其深部存在有金矿体的地段开挖浅井并进行试验。该区曾开展过植物地球化学异常剖面工作, 在花岗闪长岩和变质岩中的金矿体上方均发育 Au、Ag、Cu、Sb、Mn、V 等植物地球化学异常。Au 异常强度为 $(41.96 \sim 75.89) \times 10^{-9}$, 峰值为 $(520 \sim 738) \times 10^{-9}$ ^[33]。

2.2 浅井工程编录

浅井长 4 m, 深 5.87 m。浅井断面自上而下可分为 7 层(图 1), 分别为 A₀、A、B₁、B₂、B₃、C、D 层。

A₀ 层为硝盐壳层, 厚 0.002~0.040 m。

A 层主要为风积中—细粒砂及泥, 底部冲积—洪积物增多, 呈半松散状, 厚约 1.6 m。红沙、梭梭等植物侧根可达该层, 主根已穿过该层。

B₁ 层为冲、洪积含中砾中—细粒砂及泥, 呈半胶结状, 厚约 1.0 m。红沙主根到达该层, 梭梭主根穿过该层。

B₂ 层为冲、洪积含巨砾中—细粒砂及泥, 呈半胶结状, 厚约 1.15 m。梭梭主根穿过该层, 在该层上部还发现少数红沙细根。

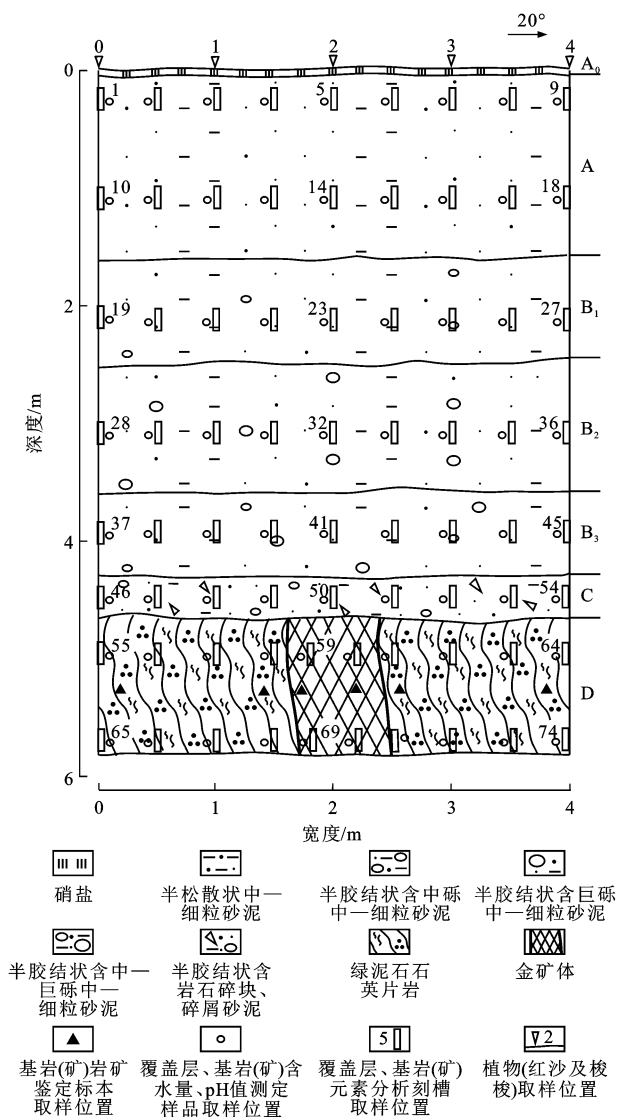
B₃ 层为冲、洪积含巨—中砾中—细粒砂及泥, 呈半胶结状, 厚约 0.7 m。梭梭主根穿过该层。

C 层主要为残积, 具有片理化大小不一岩石碎块及砂泥。该层可见石英脉大的碎块, 石英孔隙中褐铁矿锈斑发育, 厚约 0.4 m。梭梭主根穿过该层。

D 层为弱风化绿泥石英片岩, 产状近直立, 均已蚀变, 主要为硅化、含铁碳酸盐化、黄铁矿化(部分已氧化为褐铁矿), 近矿蚀变较强, 向远处逐渐减弱。岩石中顺层片理及裂隙发育。石英脉型金矿体产于片岩中, 矿体厚约 0.8 m, 倾向 20°, 倾角 70°~85°。矿石为被褐铁矿强烈污染呈深褐色的石英块体, 块体中见大量黄铁矿流失孔, 硅质隔膜及绢云母、绿泥石、黄铁矿、含铁碳酸盐等矿物。梭梭部分主根插入到基岩(矿)裂隙中。

2.3 样品采集

(1) 覆盖层及基岩样品采集。采样间距: 浅井断面上水平间距 0.5 m, 垂直间距约 1.0 m(保证各层至少有一组样品)(图 1)。样品类型及数量: ① 岩矿



A₀ 为硝盐壳层; A 为风积物层; B₁ 为冲、洪积物上层; B₂ 为冲、洪积物中层; B₃ 为冲、洪积物下层; C 为残积层; D 为基岩层(石炭系下统白山组火山变质岩系及金矿体)

图1 试验浅井地质素描及采样位置

Fig. 1 Geologic Sketch and Sampling Position of Test Shallow Well

鉴定标本, 尺寸为 3 cm × 6 cm × 9 cm (共 6 块); ②覆盖层、基岩(矿)含水量、pH 值测定样品, 覆盖层每一采样点采取砂泥(土), 质量约 200 g (共 54 件), 基岩(矿)每一采样点采取粒径为 1~2 cm 的岩(矿)碎块数块, 质量约 200 g (共 20 件)。③覆盖层、基岩(矿)元素分析样品, 刻槽取样, 槽尺寸为 10 cm × 20 cm × 5 cm, 质量约 1 kg (共 74 件), 样品粉碎至粒径为 0.074 mm, 称样 50 g 包装待分析。

(2)植物样品采集。在浅井断面 0、1、2、3、4 m 处(图 1), 覆盖层上方沿 290°方向(即矿体走向)约 10 m 距离内, 采集红沙和梭梭各 5 株, 红沙和梭梭植

株地上部分长度要求分别大于 1.0 m 和 1.5 m, 植株年龄均在 3 年左右, 分根、茎、叶 3 部分采取(共 30 件)。样品采集后, 立即用当地食用水洗净、晾干、截断、烘干(60 °C), 并粉碎至粒径为 0.2 mm, 称样 50 g 包装待分析。

2.4 样品分析

(1)基岩(矿)、覆盖物含水量(W)测定: 在现场采集覆盖物砂泥和基岩(矿)碎块样品后, 立即用感量为 0.01 g 的天平称取湿重为 M_1 的样品, 在 105 °C 下烘干 24 h 后取出, 在干燥器内冷却至室温后称取干重 M_2 。按公式 $W = (M_1/M_2 - 1) \times 100\%$ 计算覆盖物、基岩(矿)含水量(质量比, 下同)。

(2)基岩(矿)、覆盖物 pH 值测定: 半胶结覆盖物砂泥和基岩(矿)碎块粉碎过 2 mm 筛孔之后, 称取 10 g 置烧杯中, 按 1:1 的固水比例加入蒸馏水, 搅拌静置 30 min, 用 pH 计测定悬浮液 pH 值。

(3)植物、覆盖物和基岩(矿)元素分析: 用湿法消化处理植物、覆盖物和基岩(矿)样品之后进行元素定量分析, 得到了 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Mo、Co、Ni、Ti、V、Cr、Mn、K、Na、Ca、Mg、Cl 等元素含量; Au 元素分析方法为泡塑吸附-电感耦合等离子体质谱法, As、Sb 元素为原子荧光光谱法, Ag 元素为发射光谱法, Ca、Mg、K、Na 元素为原子吸收分光光度法, Cl 元素为离子色谱法, 其他元素为电感耦合等离子质谱法。

(4)基岩(矿)、覆盖层 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 测定及 Eh 值计算: 利用重铬酸钾容量法分析各覆盖层、基岩(矿) Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 含量, 通过 Nernst 方程计算求出各采样点的 Eh 值。近地表条件下, 常见 $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^-$ 反应的标准氧化还原电位为 0.771 V, 则 $Eh = 0.771 + 0.059 \log(C_o/C_r)$ 。 C_o 和 C_r 分别为氧化态 Fe^{3+} 和还原态 Fe^{2+} 含量, 由此可计算得到 Eh 值。

3 结果分析与讨论

3.1 元素在基岩(矿)及覆盖层中的分布特征

试验浅井基岩(矿)及各覆盖层元素的平均含量见表 1。浅井断面元素含量等值线见图 2、3。元素在基岩(矿)和残积层(C+D 层)中的分布可分为 3 类: 一类是成矿元素 Au 及主要伴生元素 Ag、Cu、As、Mo(Ti)含量在残积层中含量较高, 矿体中的含量高于基岩 2 倍以上, 以矿体为中心形成了原生异常; 第二类是在矿体中心部位的含量高于基岩不到 2 倍, 没有形成原生异常, 如元素 Pb、Zn、Sb、Co、Ni、

V、Cr、Mn、Mg;第三类是基岩中元素含量高于矿体中的含量,主要是盐类元素 Ca、K、Na、Cl。这可以认为是元素分布的原始基础状态。整个断面(基岩(矿)及其上部各覆盖层)上元素的分布特征为:元素 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Mo、(Ti、Cr)在 C+D 层含量最高,从 C+D→B₃→B₂→B₁→A 层呈降低趋势,有些元素到 A 层稍有增高;盐类元素 Ca、Mg、K、Na、Cl 及 Mn 从 C+D→B₃→B₂→B₁→A 层有规律或波浪式升高;元素分布从 C+D 层由下向上大致形成了元素 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Mo→元素 Ti、Cr、V、Co、Ni→元素 Ca、Mg、K、Na、Cl、Mn

的分带。从元素分布的发育状态(图 2、3)来看,元素 Au、Ag、Cu、Zn、As、Sb、Mo、Ti、V、Cr、Co、Ni、Mn 含量在矿体及上部各层形成一个高值区,富集中心在 D 层矿体,在基岩及其上部各层为低值区,而元素 Ca、Mg、K、Na、Cl 含量在矿体及上部各层形成一个低值区,在基岩上部各层为高值区,富集中心主要在 A 层。综上所述,元素的迁移富集既受到基岩和矿体中元素原始分布的影响,也受到元素本身活动性的影响,成矿及伴生元素主要富集在下部 C+D 层,盐类元素主要富集在上部 A 层。在整体上,无论哪类元素都是以垂向方向上的迁移为主。

表 1 基岩(矿)及覆盖层元素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Elements in Bedrock (Ore) and Covering Layers

层位		w(Au)/ 10 ⁻⁹	w(Ag)/ 10 ⁻⁶	w(Cu)/ 10 ⁻⁶	w(Pb)/ 10 ⁻⁶	w(Zn)/ 10 ⁻⁶	w(As)/ 10 ⁻⁶	w(Sb)/ 10 ⁻⁶	w(Mo)/ 10 ⁻⁶	w(Co)/ 10 ⁻⁶	w(Ni)/ 10 ⁻⁶	w(Ti)/ 10 ⁻⁶	w(V)/ 10 ⁻⁶	w(Cr)/ 10 ⁻⁶	w(Mn)/ 10 ⁻⁶	w(Ca)/ %	w(Mg)/ %	w(K)/ %	w(Na)/ %	w(Cl)/ 10 ⁻⁶
矿体 部位	A	144.8	0.141	84.8	20.1	133	144	107	5.60	39.3	16.8	2 838	78	34	3 212	6.25	1.30	3.77	1.62	178.3
	B ₁	108.2	0.139	56.4	31.6	76	253	122	5.07	44.4	31.7	6 073	247	62	1 996	5.22	0.76	1.84	0.89	164.0
	B ₂	122.9	0.181	64.2	32.3	96	459	101	8.96	41.5	36.8	6 223	299	88	1 961	4.19	0.61	0.13	0.73	149.3
	B ₃	450.0	0.217	61.1	34.2	127	628	149	11.88	38.5	36.3	6 620	361	112	2 131	4.30	0.81	1.20	0.80	139.7
	C+D	4 358.2	0.398	195.0	56.5	153	2 068	214	16.75	45.8	41.0	7 665	481	118	2 201	3.99	0.91	1.14	0.98	138.2
基岩 部位	A	64.9	0.116	44.9	15.7	71	105	74	2.30	26.3	17.5	1 751	62	34	2 200	6.32	1.17	4.16	2.10	240.7
	B ₁	41.7	0.091	34.2	19.9	53	100	90	1.88	25.2	15.2	1 661	74	40	788	4.41	0.40	2.11	0.92	218.0
	B ₂	69.4	0.102	31.8	24.3	53	207	92	1.85	26.3	18.5	2 707	102	62	1 210	4.68	0.39	1.87	1.37	216.3
	B ₃	114.1	0.114	29.5	28.8	67	372	120	2.72	24.3	19.6	3 017	91	69	1 507	5.17	0.49	2.10	1.41	185.8
	C+D	179.5	0.137	44.6	44.1	87	918	172	5.45	28.3	27.0	3 521	246	92	1 452	4.95	0.68	2.14	1.87	165.0

注:分析单位为中国有色桂林矿产地质研究院测试中心;w(·)为元素或化合物含量。

3.2 基岩(矿)及覆盖层含水量、pH 值和 Eh 值的变化特征

试验浅井基岩(矿)及各覆盖层含水量、pH 值、Fe³⁺ 和 Fe²⁺ 含量及计算的 Eh 值见表 2。浅井断面含水量、pH 值和 Eh 值等值线见图 3。基岩(矿)及覆盖层含水量由下至上从基岩 C+D 层的 15.06%~15.24%有规律降低到上部风成砂泥 A 层的 8.15%~8.40%,含水量等值线呈舒缓波状。含水量与各类元素含量的相关性分析发现:①覆

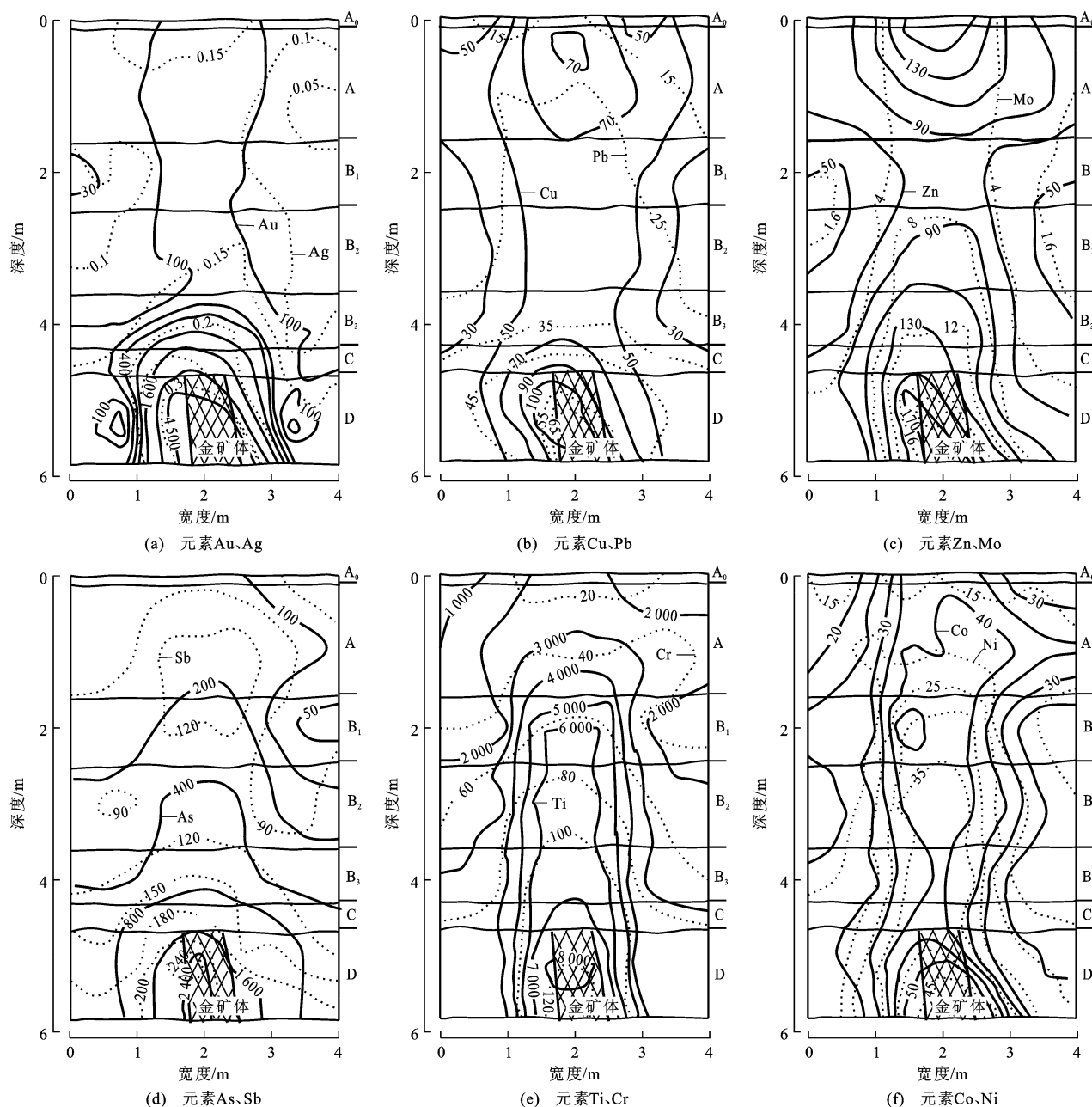
盖层元素 Cr、As、Sb、Pb、V、Ti、Ni、Au、Mo 与含水量呈非线性正相关关系,这些元素含量由下至上随着含水量的降低而不同程度地降低;②覆盖层元素 Cl、K、Mg、Ca、Na、Mn、Cu、Zn 与含水量呈非线性负相关关系,这些元素含量由下至上随着含水量的降低而不同程度地增加;③有些元素(如 Ag、Co)与含水量的相关性不显著,近乎零相关。这表明不同元素在覆盖层中的分布同含水量有着密切的关系。

表 2 基岩(矿)及覆盖层测定的 pH 值、含水量、Fe³⁺ 含量、Fe²⁺ 含量及计算的 Eh 值

Tab. 2 Measured pH Values and Contents of Water, Fe³⁺ and Fe²⁺ and Calculated Eh in Bedrock (Ore) and Covering Layers

层位		含水量/ %	pH	w(Fe ³⁺)/ %	w(Fe ²⁺)/ %	Eh/V	层位		含水量/ %	pH	w(Fe ³⁺)/ %	w(Fe ²⁺)/ %	Eh/V
矿体 部位	A	8.40	8.117	7.072	0.335	0.693 0	围 岩 部 位	A	8.15	8.975	7.373	0.278	0.687 1
	B ₁	9.39	7.933	7.157	0.357	0.694 3		B ₁	8.99	8.833	7.635	0.315	0.689 3
	B ₂	10.03	7.600	7.327	0.400	0.696 7		B ₂	10.51	8.583	7.580	0.333	0.691 0
	B ₃	12.15	7.600	7.353	0.403	0.696 7		B ₃	12.60	8.400	8.670	0.298	0.684 3
	C+D	15.24	7.467	13.237	0.570	0.690 2		C+D	15.06	8.267	11.450	0.435	0.693 9

注:分析单位为中国有色桂林矿产地质研究院测试中心。



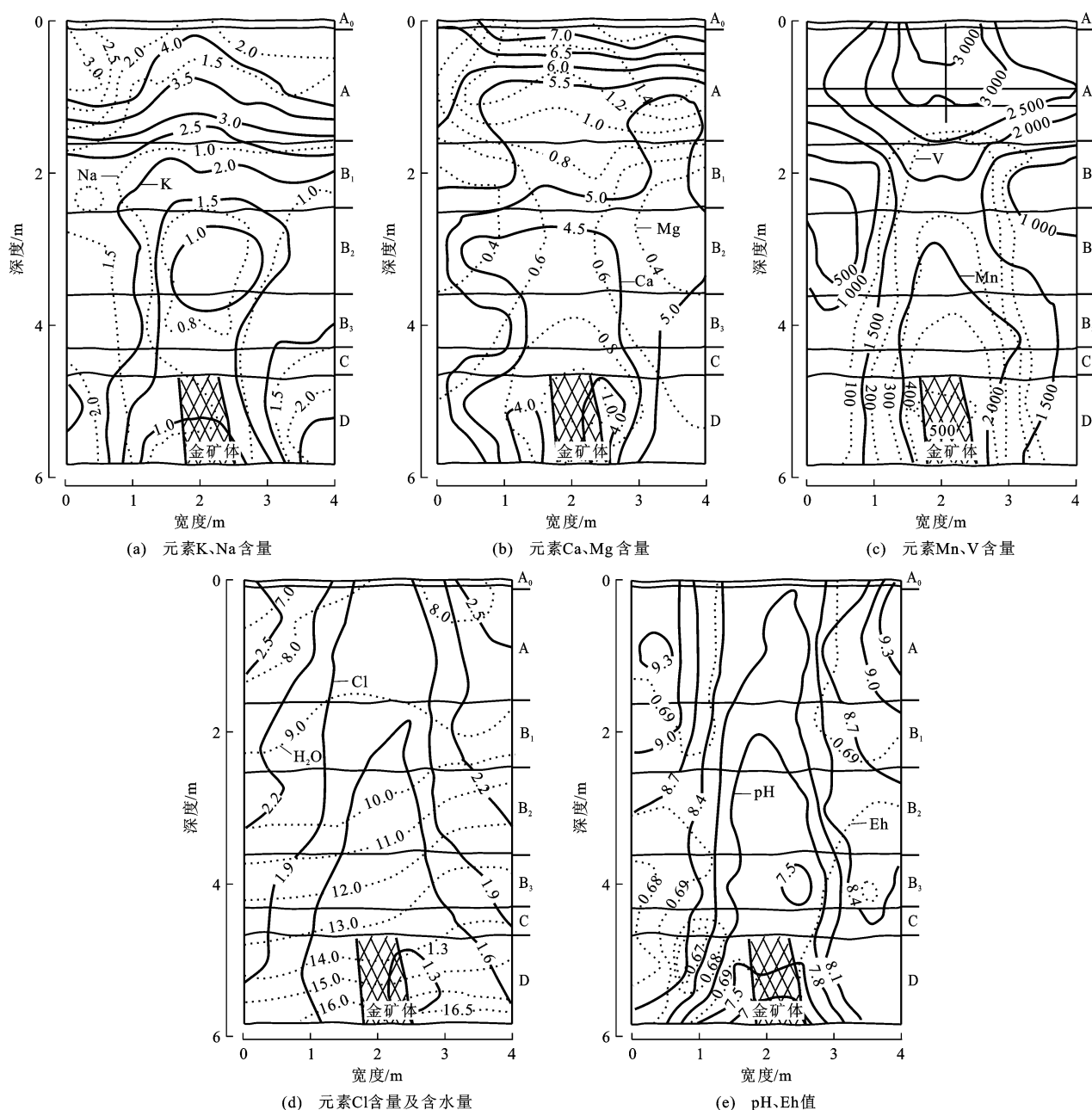
Au 含量单位为 10^{-9} , 其他元素含量单位为 10^{-6}

图 2 浅井断面元素含量等值线

Fig. 2 Contour Maps of Element Contents in the Section of Shallow Well

基岩(矿)及覆盖层 pH 值和 Eh 值分布特征差别很大。Eh 值在中部矿体及向上覆盖层中较高, 两侧基岩及其上部较低, 而 pH 值正好相反, 因此, 矿体及其上部覆盖层是一个相对氧化酸性的环境, 而其周围基岩及其上部是一个相对还原碱性的环境。这可能同矿体产出部位(断面中部)及水垂直向上位移有一定关系。pH 值和 Eh 值与各类元素含量的相关性分析发现: ①基岩(矿)及上部覆盖层元素 Mo、Co、Ni、Ti、V、Cu、Au、Ag、Pb、Zn、As、Sb、Cr、Mn 含量与 Eh 值呈非线性正相关关系, 与 pH 值呈

非线性负相关关系, 反映出这些元素含量从两侧基岩上部覆盖层相对还原碱性的环境→中部矿体上部覆盖层相对氧化酸性的环境是增高的, 说明这些元素的富集环境主要是相对氧化酸性的环境; ②基岩(矿)及上部覆盖层元素 Cl、Na、K、Ca 与 Eh 值呈非线性负相关关系, 与 pH 值呈非线性正相关关系, 反映出这些元素含量从两侧基岩上部覆盖层相对还原碱性的环境→中部矿体上部覆盖层相对氧化酸性的环境是降低的, 说明这些元素的主要富集环境是相对还原碱性的环境; ③有些元素(如 Mg)与 pH 值和



元素含量及含水量单位为%; Mn、V、Cl含量单位为 10^{-6} ; Eh值单位为V

图3 浅井断面元素含量和含水量及pH、Eh值等值线

Fig. 3 Contour Maps of Contents of Element and Water, and pH and Eh Values in the Section of Shallow Well

Eh值的相关性不显著,近乎零相关。

3.3 生长在基岩(矿)及覆盖层地表的植物中元素含量特征

试验浅井地表生长的红沙和梭梭中元素含量见表3。红沙和梭梭中元素含量特征基本上继承了其生长的基质中元素含量分布特征。在矿体及其上覆盖层中形成的元素Au、Ag、Cu、Zn、As、Sb、Mo、Ti、V、Cr、Co、Ni等含量高值区,其地表生长的红沙和梭梭中这些元素的含量也相对较高,其中元素Au、Ag、Cu、As、Mo含量高于基岩及其上覆盖层地表生

长的红沙和梭梭中元素含量2倍以上,形成了植物地球化学异常;而在基岩及其上覆盖层中形成的元素Ca、Mg、K、Na、Cl、Mn含量高值区,其地表生长的红沙和梭梭中这些元素的含量也相对较高。总体上,多数元素含量在红沙和梭梭根、叶部较高,在茎部较低。元素Au、Ag、Cu、Ti、V、Cr、Mn、Ca含量,根部最大,叶部居中,茎部最少;元素Zn、Mo、Co、Mg、K、Na、Cl含量,叶部最大,根部居中,茎部最少;元素Pb、As、Ni含量,根部最大,茎部居中,叶部最少。这反映出营养性元素向叶部积聚的能力较

强,而毒性较大的元素主要积聚在根部。比较而言,在矿体及其上覆盖层中生长的梭梭中元素 Au、Ag、As、Sb、Mo、Zn 异常的含量要高于红沙,这可能与这些元素在 C+D 层矿体中心部位含量高而梭梭的根又能达到 C+D 层有关。梭梭的根可以直接接触到矿体或岩石地球化学异常,可能形成了“固-生物地球化学异常”;而红沙的根最多只能到达 B 层上部,其形成的这些元素“异常”可能

主要与水化学异常中的元素有关,属于“液-生物地球化学异常”^[34-36]。同时,对于一些倾向于在剖面中上部富集的元素(如 Mn、Co、Ni、Cl、Ca、Mg、K、Na 等),根部相对较浅的红沙元素含量都高于根部相对较深的梭梭。由此可见,不同植物的根深不同,其接触到的基质中元素组合、元素含量不同,对不同植物产生的地球化学异常元素组合、强度和发育程度有着重要的影响。

表 3 地表生长的红沙和梭梭中元素分析结果

Tab. 3 Analysis Results of Elements in *Reaumuria Soongrica* and *Haloxylon Ammodendron* on the Soil Surface

测试部位			w(Au)/ 10 ⁻⁹	w(Ag)/ 10 ⁻⁶	w(Cu)/ 10 ⁻⁶	w(Pb)/ 10 ⁻⁶	w(Zn)/ 10 ⁻⁶	w(As)/ 10 ⁻⁶	w(Sb)/ 10 ⁻⁶	w(Mo)/ 10 ⁻⁶	w(Co)/ 10 ⁻⁶	w(Ni)/ 10 ⁻⁶	w(Ti)/ 10 ⁻⁶	w(V)/ 10 ⁻⁶	w(Cr)/ 10 ⁻⁶	w(Mn)/ 10 ⁻⁶	w(Cl)/ 10 ⁻⁶	w(Ca)/ %	w(Mg)/ %	w(K)/ %	w(Na)/ %
矿体上部	红沙	叶	244.6	0.257	74.2	7.4	168	33	21	7.21	7.61	5.1	208	28	15	361	89.3	2.40	0.84	2.37	2.62
		茎	181.2	0.221	48.2	8.3	81	41	23	4.77	5.50	8.1	163	25	11	211	44.6	1.72	0.53	1.13	1.14
		根	386.6	0.327	66.5	11.3	134	68	23	5.65	7.20	12.4	223	49	24	456	74.3	3.19	0.75	1.43	1.88
		平均	270.8	0.268	63.0	9.0	128	47	22	5.87	6.77	8.5	198	34	17	342	69.4	2.44	0.71	1.64	1.88
	梭梭	叶	356.8	0.285	74.4	6.9	246	55	36	10.47	7.14	5.4	211	31	16	271	67.8	1.61	0.80	2.11	1.85
		茎	215.7	0.277	51.2	9.1	148	48	47	6.65	4.21	8.4	172	26	13	221	32.1	2.12	0.41	1.11	1.11
		根	472.7	0.412	67.8	12.3	216	97	55	8.29	5.69	10.4	243	51	27	397	64.2	2.37	0.71	1.56	1.46
		平均	348.4	0.325	64.5	9.4	203	67	46	8.47	5.68	8.1	209	36	19	296	54.7	2.03	0.64	1.59	1.47
基岩上部	红沙	叶	89.5	0.154	26.6	5.6	78	15	13	2.14	4.81	4.2	142	15	9	251	126.7	2.82	1.08	2.56	3.08
		茎	71.6	0.108	24.1	4.3	42	22	14	1.65	5.82	7.1	102	12	7	188	78.0	2.11	0.57	1.21	1.37
		根	164.2	0.132	32.8	9.8	64	31	17	2.07	6.43	10.3	165	27	18	317	96.3	3.68	0.81	1.87	2.44
		平均	108.4	0.131	27.8	6.6	61	23	15	1.95	5.72	7.2	136	18	11	252	100.3	2.87	0.82	1.88	2.30
	梭梭	叶	85.6	0.116	27.8	6.9	87	14	12	2.38	4.04	4.2	156	18	7	204	116.2	2.16	1.03	2.11	2.67
		茎	75.4	0.137	25.4	5.1	51	26	15	1.75	5.28	6.1	113	15	5	155	59.7	2.12	0.56	1.11	1.17
		根	165.3	0.144	35.6	10.8	72	37	21	2.77	5.78	8.4	176	31	21	216	94.8	3.37	0.74	1.77	2.20
		平均	108.8	0.132	29.6	7.6	70	26	16	2.30	5.03	6.2	148	21	11	192	90.2	2.55	0.78	1.66	2.01

注:分析单位为中国有色桂林矿产地质研究院测试中心。

4 植物地球化学异常形成的地学机制

土壤水盐运移理论认为:在干旱少雨强烈蒸发的地区,土壤水中的可溶性盐类通过水的垂直运动向地表累积是土壤积盐化过程最为普遍的形式,土壤水是盐分迁移的重要载体^[37-39]。本次试验金矿的成矿和伴生元素在荒漠覆盖层中的迁移与这种水盐运移过程的机制极为相似。蒸发条件下,土壤水盐运移的数学方程模型为^[38-39]

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(D(\theta) \frac{\partial(\theta c)}{\partial z}) \pm \frac{\partial(kc)}{\partial z} - S$$

式中:θ 为土壤体积含水量;t 为时间;z 为垂向坐标,向下为正,向上为负;D(θ) 为水扩散系数函数;k 为水渗流系数;c 为土壤水溶液质量浓度;S 为根系吸水项。

在蒸发条件下,土壤水溶液向上运移的量随着时间的变化与土壤水溶液的扩散系数、渗流系数、质量浓度及植物根系对水的吸收作用有关。土壤水向上运移的动力有外界的蒸发能力(由外界气象条件决定的潜在蒸发量)和土壤水向上输送的能力(主要取决于土壤含水量及其对扩散系数、渗流系数产生影响的变化梯度),植物根系对水的吸收也是重要的因素。试验区年降水量不到 75 mm,而潜在年蒸发量大于 2 300 mm,蒸发是该区土壤水向上运移的最重要动力;基岩(矿)及覆盖物中含水量由下至上从 15.06%~15.24%降低到 8.15%~8.40%,含水量变化梯度约-0.5,说明土壤水向上输送能力提供了一定动力来源。试验区植物的覆盖度虽然有限(植物总覆盖度为 15%~20%),但根系对土壤中水分及元素的吸取并通过蒸腾作用向大气挥发仍然是导

致土壤水向上运移的重要动力。

根据水盐运移的基本理论,结合试验剖面基岩(矿)及覆盖层含水量、pH 值、Eh 值的分布特征以及元素迁移特点,不同根深植物接触到的基质类型以及产生的地球化学异常元素组合和强度差异,可以初步建立该区干旱荒漠覆盖条件下植物地球化学异常形成的地学机制模型(图 4)。

在干旱荒漠覆盖条件下,由于强大的外界潜在蒸发力、含水量及其变化梯度、植物吸收蒸腾等驱动力,地下水-土壤水携带的各种可溶性成分和成矿-伴生元素垂直向上运移,随着土壤水的减少,到达覆盖层上部后,作为溶剂的水分被蒸发,而作为溶质的各种元素被截留下来。总体来说,在垂向上溶度积较大的盐类元素 K、Na、Cl、Ca 淀积在上部,溶度积相对较小的成矿-伴生元素 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Mo 等在下部。同时,由于矿体产出部位的影响,在横向上矿体及其上部覆盖层形成的相对氧化酸性的环境形成了 Au、Ag、Cu、Zn、As、Sb、Mo 等元素相对高含量的淀积区,两侧基岩及其上部覆盖层形成的相对还原碱性的环境形成了 K、Na、Cl、Ca、Mg、Mn 等元素相对高含量的淀积区。生长在矿体部位的植物吸收了较多的 Au、Ag、Cu、As、Mo

等元素,形成了植物地球化学异常。不同根深的植物对土壤中水分及元素的吸取深度和基质类型不同,导致植物吸收的元素组合及含量不同,形成的植物地球化学异常“成因”不同。因此,在旱区荒漠覆盖条件下,植物地球化学异常的形成主要与水盐运移将下部成矿-伴生元素搬运到上部植物根系所能吸收的部位有关,不同根深的植物产生的地球化学异常元素组合、强度等特征具有一定的差异。

5 结 语

(1)460 金矿床地处甘肃北山西北部,属典型大陆性温带干旱气候,地貌为山前平原荒漠戈壁及残山丘陵,植被是以温带半灌木和灌木荒漠为主的植被类型,占优势的植物群落为红沙(*Reaumuria soongrica*),次为梭梭(*Haloxyylon ammodendron*),二者均为典型的旱生植物。

(2)试验区年降水量不到 75 mm,潜在年蒸发量大于 2 300 mm,因此,蒸发是该区土壤水向上运移的最重要动力;基岩及其上部覆盖物中含水量变化梯度约-0.5,为土壤水向上运移提供了一定的动力;植物总覆盖度为 15%~20%,其根系对土壤中水分及元素的吸取蒸腾也是导致土壤水向上运移的

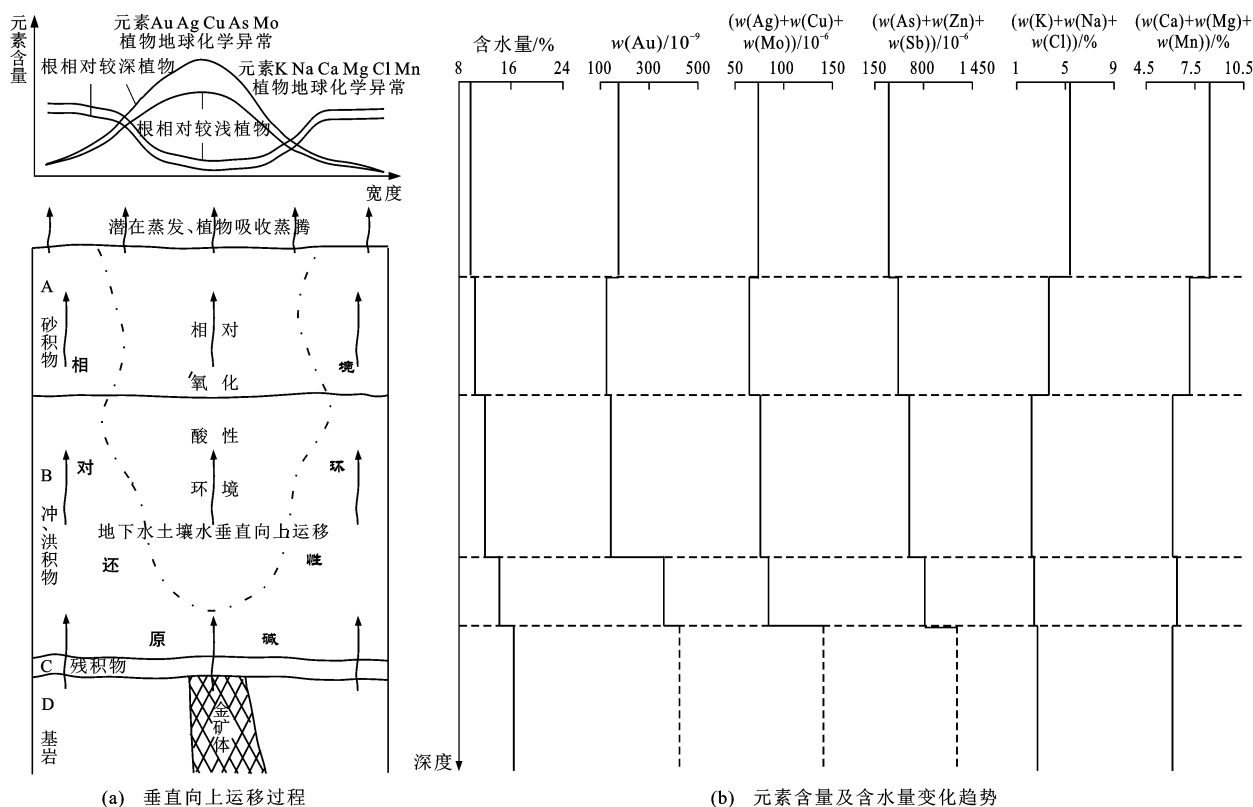


图 4 460 金矿床植物地球化学异常形成的地学机制模型

Fig. 4 Formation Geo-mechanism Model of Botanogeochemical Anomaly in 460 Au Deposit

重要动力。在这些驱动力的作用下,荒漠覆盖条件下金矿床的地下水和土壤水携带的各种可溶性成分和成矿-伴生元素在垂直方向上运移。

(3)元素的迁移富集既受到矿体和基岩中元素原始分布的影响,也受到元素所处环境及本身活动性的影响。在垂向上,Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Mo等成矿-伴生元素主要富集在下部C+D层,K、Na、Cl、Ca等盐类元素主要富集在上部A层。在横向上,矿体及其上部覆盖层形成的相对氧化酸性环境形成了Au、Ag、Cu、Zn、As、Sb、Mo等元素相对高含量区,两侧基岩及其上部覆盖层形成的相对还原碱性环境形成了K、Na、Cl、Ca、Mg及Mn等元素相对高含量区。

(4)在矿体上部地表生长的红沙和梭梭中元素Au、Ag、Cu、As、Mo含量是两侧基岩上部地表生长的红沙和梭梭的2倍以上,形成了植物地球化学异常,而在基岩上部地表生长的红沙和梭梭中元素Ca、Mg、K、Na、Cl、Mn含量相对较高,表明红沙和梭梭中元素含量基本上继承了其生长的基质中元素含量分布的特征。多数元素在红沙和梭梭根、叶部含量较高,营养性元素(如Zn、Mo、Mg、K、Na、Cl等)向叶部积聚的能力较强,而毒性较大的元素(如Pb、As、Ni)主要积聚在根部。

(5)矿体上部生长的梭梭中元素Au、Ag、As、Sb、Mo、Zn异常的含量要高于红沙。这可能与梭梭的根(深4 m以下)能达到C+D层并直接接触到矿体或岩石地球化学异常有关,梭梭可能形成了“固-生物地球化学异常”,而红沙的根(深2 m以下)最多只能到达B层上部,其形成的元素“异常”可能主要与水化学异常有关,属于“液-生物地球化学异常”。因此,不同植物的根深不同,其接触到的基质中元素组合、元素含量不同,对不同植物产生的地球化学异常元素组合、强度和发育程度有着重要影响。

(6)本次试验金矿的成矿-伴生元素在荒漠覆盖层中的迁移同蒸发条件下水盐运移过程的机制极为相似。结合试验剖面氧化-还原和酸碱性条件、元素分布特征和迁移特点、不同根深的植物接触到的基质类型以及产生的地球化学异常元素组合和强度差异,初步建立了干旱荒漠覆盖条件下植物地球化学异常形成的地学机制模型。旱区荒漠植物地球化学异常的形成主要与水盐运移将下部成矿-伴生元素搬运到上部植物根系所能吸收的部位有关,不同根深的植物产生的地球化学异常元素组合、强度等特

征具有一定的差异。

参考文献:

References:

- [1] LINTIM M J, BUTT C R M, SCOTT K M. Gold in Vegetation and Soil: Three Case Studies from the Goldfields of Southern Western Australia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1997, 58(1): 1-14.
- [2] REID N, HILL S M, LEWIS D M. Biogeochemical Expression of Buried Au-mineralisation in Semi-arid Northern Australia: Penetration of Transported Cover at the Titania Gold Prospect, Tanami Desert Australia[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2009, 9(3): 267-273.
- [3] REID N, HILL S M. Biogeochemical Sampling for Mineral Exploration in Arid Terrains: Tanami Gold Province, Australia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2010, 104(3): 105-117.
- [4] REID N, HILL S M. Spinifex Biogeochemistry Across Arid Australia: Mineral Exploration Potential and Chromium Accumulation[J]. Applied Geochemistry, 2012, 29: 92-101.
- [5] DUNN C E. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, Volume 9[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [6] HARJU L, HULDEN S G. Birch Sap as a Tool for Biogeochemical Prospecting[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1990, 37(3): 351-365.
- [7] VILADEVALL M, PUIGSERVER D, SAAVEDRA J, et al. Biogeochemical Exploration Using the Thola Shrub in the Andean Altiplano, Bolivia[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2012, 12(1): 33-44.
- [8] OKUJENI C D. Biogeochemical Investigation into Possible Use of Leaf and Bark Samples of Some Savanna Trees in Prospecting for Uranium in the Upper Benue Trough, Niger[J]. Journal of Scientific Research, 1987, 1: 57-64.
- [9] BADRI M, SPRINGUEL I. Biogeochemical Prospecting in the South-eastern Desert of Egypt[J]. Journal of Arid Environments, 1994, 28(3): 257-264.
- [10] DUNN C E, BROOKS R R, EDMONDSON J, et al. Biogeochemical Studies of Metal-tolerant Plants from Southern Morocco[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1996, 56(1): 13-22.
- [11] FERNANDEZ-TURIEL J L, ACENOLAZA P, MEDINA M E, et al. Use of Three Widely Spread Plant Species from American Arid Regions for Exploration

- of Tin Mineralizations[J]. Journal of Arid Environments, 2003, 53(4): 607-618.
- [12] NKOANE B B M, SAWULA G M, WIBETOE G, et al. Identification of Cu and Ni Indicator Plants from Mineralised Locations in Botswana[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2005, 86(3): 130-142.
- [13] 孔令韶, 孙世洲, 罗金铃, 等. 青海锡铁山矿区铅、锌的植物地球化学特征及其与成矿的关系[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1988, 12(1): 40-49.
- KONG Ling-shao, SUN Shi-zhou, LUO Jin-ling, et al. The Phytocommunity and Phytogeochemistry Characteristics of Pb and Zn in the Mining Area of Xitieshan Mountain in Qinghai Province and Their Relationship with the Pb and Zn Deposits[J]. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 1988, 12(1): 40-49.
- [14] 孔令韶, 高平, 任天祥, 等. 内蒙阿拉善脑木洪铜矿区的植物地球化学特征[J]. 植物学报, 1992, 34(10): 781-789.
- KONG Ling-shao, GAO Ping, REN Tian-xiang, et al. Characteristics of Phytogeochemistry in Naomuhong Copper Mine Area at the Alashan of Nei Monggol[J]. Acta Botanica Sinica, 1992, 34(10): 781-789.
- [15] 沈远超, 杨金中, 李慎之. 生物地球化学方法与金矿找矿: 以新疆西准噶尔安齐成矿断裂带为例[J]. 地质科技情报, 1999, 18(3): 55-59.
- SHEN Yuan-chao, YANG Jin-zhong, LI Shen-zhi. Application of Biogeochemistry in Gold Deposit Exploration as Exemplified by Anqi Metallogenic Fault in Western Junggar[J]. Geological Science and Technology Information, 1999, 18(3): 55-59.
- [16] 宋玮, 雷良奇, 宋慈安, 等. 新疆喀拉通克铜镍矿区植物地球化学特征及找矿有效植物和元素的选择[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(2): 195-206.
- SONG Wei, LEI Liang-qi, SONG Ci-an, et al. Characteristics of Phytogeochemistry and Prospecting Choices of Effective Plants and Elements in Kalatongke Cu-Ni Ore Field, Xinjiang[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(2): 195-206.
- [17] 宋慈安, 宋玮, 雷良奇, 等. 干旱荒漠区勘查植物地球化学研究现状及关键科学问题[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(3): 595-606.
- SONG Ci-an, SONG Wei, LEI Liang-qi, et al. Current Research and Critical Scientific Issues of Exploration Vegetation Geochemistry in Arid Desert Area[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2014, 34(3): 595-606.
- [18] 宋慈安, 雷良奇. 我国勘查植物地球化学的研究现状及发展方向[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(1): 1-11.
- SONG Ci-an, LEI Liang-qi. Research and Orientation of Exploration Vegetation Geochemistry in China[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2009, 29(1): 1-11.
- [19] 宋慈安, 雷良奇, 杨启军, 等. 甘肃公婆泉铜矿区植物地球化学特征[J]. 地球化学, 2000, 29(4): 343-350.
- SONG Ci-an, LEI Liang-qi, YANG Qi-jun, et al. Characteristics of Phytogeochemistry in Gongpoquan Copper Ore Field, Gangsu, China[J]. Geochimica, 2000, 29(4): 343-350.
- [20] 宋慈安, 雷良奇, 杨启军, 等. 甘肃北山金、铜矿床红沙的植物地球化学特征及其找矿意义[J]. 地质与勘探, 2001, 37(3): 45-49.
- SONG Ci-an, LEI Liang-qi, YANG Qi-jun, et al. Botanical Geochemistry of Redwood of the Au-Cu Deposits in Beishan, Gansu[J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(3): 45-49.
- [21] 宋慈安, 雷良奇, 杨启军, 等. 甘肃公婆泉铜矿区生物地球化学异常特征及找矿预测模式[J]. 地质地球化学, 2002, 30(2): 40-45.
- SONG Ci-an, LEI Liang-qi, YANG Qi-jun, et al. Characteristics of Biogeochemical Anomalies and Prognostic Model in Gongpoquan Copper Ore Field, Gansu, China[J]. Geology-geochemistry, 2002, 30(2): 40-45.
- [22] 宋慈安, 雷良奇, 杨启军, 等. 甘肃公婆泉铜矿化集中区火山岩的地球化学特征[J]. 桂林工学院学报, 2003, 23(1): 18-25.
- SONG Ci-an, LEI Liang-qi, YANG Qi-jun, et al. Geochemical Characteristics in Gongpoquan Copper Mineralized Province, Gansu[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2003, 23(1): 18-25.
- [23] 王素萍, 张存杰, 韩永翔. 甘肃省不同气候区蒸发量变化特征及其影响因子研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 675-680.
- WANG Su-ping, ZHANG Cun-jie, HAN Yong-xiang. Trend of Potential Evapotranspiration and Pan Evaporation and Their Main Impact Factors in Different Climate Regions of Gansu Province[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(3): 675-680.
- [24] 冯建森, 邹佳辉, 张玉良. 甘肃马鬃山地区梭梭林分布特征及植被恢复技术初探[J]. 林业实用技术, 2013(9): 1-3.
- FENG Jian-sen, ZOU Jia-hui, ZHANG Yu-liang. The Distribution Characteristics of Haloxylon Ammodendron Forest of Mazong Area in Gansu Province and Vegetation Restoration Technologies[J]. Forest Science and Technology, 2013(9): 1-3.
- [25] 陈清善, 曹丽娟. 甘肃马鬃山 25 年气温和降水特征分

- 析[J]. 北京农业, 2015(3):137.
- CHEN Qing-shan, CAO Li-juan. Temperature and Precipitation Characteristics Between 25 Years in Mazongshan, Gansu[J]. Beijing Agriculture, 2015(3):137.
- [26] 姚铁山. 甘肃马鬃山(北山)地区水文地质条件简介[J]. 水文地质工程地质, 1959(6):22-24.
- YAO Tie-shan. Introduction of the Regional Hydrogeological Conditions in Mazongshan (Beishan) Area, Gansu[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1959(6):22-24.
- [27] 黄大桑. 甘肃植被[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社, 1997.
- HUANG Da-sang. Vegetation in Gansu Province[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1997.
- [28] 贾志清, 卢琦. 梭梭[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2005.
- JIA Zhi-qing, LU Qi. Haloxylon Ammodendron[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.
- [29] 中国科学院兰州沙漠研究所. 中国沙漠植物志:第二卷[M]. 北京:科学出版社, 1987.
- Lanzhou Institute of Desert Research, Chinese Academy of Sciences. Desert Flora of China: The Second Volume[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [30] 黄增保, 魏志军, 金霞. 甘肃北山460金矿埃达克质石英闪长岩地球化学特征及意义[J]. 甘肃地质学报, 2005, 14(2):30-34.
- HUANG Zeng-bao, WEI Zhi-jun, JIN Xia. The Geochemical Characteristics of Mine Adakitic Quartz-diorite Complex from the Beishan Area, Gansu Province and Its Geological Significance[J]. Acta Geologica Gansu, 2005, 14(2):30-34.
- [31] 杨兴吉. 甘肃省肃北县460金矿控矿因素及找矿方向[J]. 甘肃科技, 2009, 25(7):52-53, 24.
- YANG Xing-ji. Ore Controlling Factors and Prospecting Direction of 460 Gold Deposit in Subei County, Gansu Province[J]. Gansu Science and Technology, 2009, 25(7):52-53, 24.
- [32] 杨小三, 刁海忠. 甘肃北山460金矿区矿床地质特征及外围找矿方向探讨[J]. 科技信息, 2013(13):425-426.
- YANG Xiao-san, DIAO Hai-zhong. Geological Characteristics and Prospecting Direction of 460 Gold Deposit in the Beishan Area, Gansu Province[J]. Science and Technology Information, 2013(13):425-426.
- [33] 宋慈安, 雷良奇, 杨仲平. 北山荒漠景观区金、铜矿床植物地球化学找矿试验[J]. 物探与化探, 2012, 36(3):332-338.
- SONG Ci-an, LEI Liang-qi, YANG Zhong-ping. Botanical-geochemical Prospecting Test in Gold and Copper Deposits of Beishan Desert Area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(3):332-338.
- [34] 科瓦列夫斯基 А.Л. 金属矿床的生物地球化学晕[J]. 地质地球化学, 1977(6):48-58.
- КОВАЛЕВСКИЙ А.Л. Biogeochemical Halo of Metal Deposits[J]. Geology-geochemistry, 1977(6):48-58.
- [35] 科瓦列夫斯基 А.Л. 生物地球化学法的找矿深度[J]. 地质地球化学, 1987(7):20-22.
- КОВАЛЕВСКИЙ А.Л. Prospecting Depth of Biogeochemical Method[J]. Geology-geochemistry, 1987(7):20-22.
- [36] 任天祥, 李立, 张华, 等. 俄罗斯的勘查生物地球化学:赴俄罗斯考察见闻[J]. 国外地质勘探技术, 1993(2):24-28, 31.
- REN Tian-xiang, LI Li, ZHANG Hua, et al. Russia's Exploration of Biogeochemistry: Visit to Russia[J]. Foreign Geoexploration Technology, 1993(2):24-28, 31.
- [37] 姚德良, 李新. 塔里木盆地绿洲农田土壤水盐运动动力学模式研究[J]. 干旱区地理, 1998, 21(1):10-17.
- YAO De-liang, LI Xin. Study on Mechanical Model of Water-salt Movement in Soil of Oasis Cropland in Tarim Basin[J]. Arid Land Geography, 1998, 21(1):10-17.
- [38] 黄领梅, 沈冰. 水盐运动研究述评[J]. 西北水资源与水工程, 2000, 11(1):6-12.
- HUANG Ling-mei, SHEN Bing. Review on Advance in Water and Salt Dynamics Studies[J]. Northwest Water Resources and Water Engineering, 2000, 11(1):6-12.
- [39] 姚德良, 朱进生, 谢正桐, 等. 土壤水盐运动模式研究及其在干旱区农田的应用[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3):286-290.
- YAO De-liang, ZHU Jin-sheng, XIE Zheng-tong, et al. Model on Water-salt Movement and Application in Field of Arid Land[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(3):286-290.