

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.03.001

深循环地下水作用下红土与黄土成因研究

陈建生¹,王文凤²

(1. 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098; 2. 河海大学大禹学院,江苏 南京 210098)

摘要:通过研究阿拉善自流井区出现的红化地层,发现富含 Fe^{2+} 的井水涌出地表后形成了 Fe_2O_3 胶膜,铁质胶膜吸附在土颗粒的表面形成了红土层,表明土壤红化作用可以与气候无关。在上地幔高导低速层中可能存在地下水的导水通道,玄武岩中的 FeO 、 MgO 中的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等被超临界水(supercritical water, SCW)萃取带出。深循环地下水维系了黄土高原风尘物的连续堆积,早期渗漏进入上地幔导水通道的地下水被加热成为SCW,被萃取带出地表的 Fe^{2+} 与空气中的 O_2 发生氧化反应生成 Fe_2O_3 胶膜,铁质胶膜吸附在风尘颗粒的表面形成红土。2.5 Ma以来,玄武岩导水通道温度降低到临界点以下,地下水的萃取作用大幅度减弱,风积土显示为黄色,表明黄土高原颜色的转变与气候变化无关。由于深海沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 与全球冰量呈正相关,冰量与全球降水量呈负相关,而深循环地下水量与全球降水量呈正相关,由此可知,鄂尔多斯黄土沉积层碳酸盐与全氧化铁含量与深海 $\delta^{18}\text{O}$ 呈高度负相关。

关键词:土壤红化;超临界水;深循环地下水; Fe_2O_3 胶膜;白云岩

中图分类号:P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2017)03-0001-07

Study on formation mechanism of laterite and loess soils under action of deep groundwater circulation

CHEN Jiansheng¹, WANG Wenfeng²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Dayu College, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In the study of the red stratum surrounding artesian wells in the Alashan region, it was found that the well water rich in Fe^{2+} gushed out of the surface and the Fe_2O_3 film was formed, and then the ferriferous film adsorbed on the surface of soil particles to generate the red soil stratum, indicating that soil reddening could be unrelated to climate change. In the upper mantle, there may be some groundwater channels in the high-conductivity and low-velocity layers. Fe^{2+} , Mg^{2+} , and other ions from FeO and MgO in the basalt were extracted by supercritical water (SCW) and flowed upward to the surface. The deep groundwater circulation maintained the aeolian dusts continuous deposits on the Loess Plateau. Groundwater that infiltrated into the upper mantle lithospheric channels in an early period was heated to generate SCW, and Fe^{2+} was extracted from magmatic rock and flowed out of the ground. Oxidation reaction occurred between Fe^{2+} and oxygen in the air, and the Fe_2O_3 film was formed. The ferriferous film adsorbed on the particles to generate the red soil stratum. Over the 2.5 million years, the temperature of groundwater channels was lower than the supercritical water point, the extraction effect was greatly weakened, and the aeolian soil became yellow, indicating that there was no relationship between climate change and the change of color of the Loess plateau. In addition, the global ice volume was positively correlated with $\delta^{18}\text{O}$ in deep sea sediments and negatively correlated with global precipitation, and the volume of deep groundwater circulation was positively correlated with global precipitation. Therefore, the contents of carbonate and total iron

基金项目:国家自然科学基金(51578212);科技部国家重点基础研究发展计划(2012CB417005)
作者简介:陈建生(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事地下水深循环方面的研究。E-mail:jschen@hhu.edu.cn

oxide in the loess deposits in Ordos had significantly negative correlation with $\delta^{18}\text{O}$ in deep sea sediments.

Key words: soil reddening; supercritical water; deep groundwater circulation; Fe_2O_3 film; dolomite

1 红土研究现状

中国红土分布广泛,在上新世(2.6 Ma ~ 5.3 Ma)时期,北部红土分布范围多集中在黄河周围,随着时间的变迁,红土分布区域不断南移,到晚更新世冰期及亚间冰期,红土基本分布在北京——兰州一线以南地区^[1]。北方红土年代早于南方红土,被认为是与青藏高原的隆升有关^[2]。李吉均等^[3]认为,上新世青藏高原的高度只有 1 000 m,印度季风可以到达鄂尔多斯等北方大部分地区,气候为暖湿;早更新世(0.73 Ma ~ 2.43 Ma)青藏高原的高度上升达到 2 000 m,印度季风被阻挡而不能达到鄂尔多斯等北方地区,北方的气候转为冷干。但是,Rowley 等^[4]通过盆地沉积物氧同位素分析认为,40 Ma 之前,青藏高原南部隆升高度已经达到了 4 000 m。显然,通过青藏高原隆升关系解释北方红土成因受气候控制的观点存在争议。

黄土高原是由上部的黄土与下伏的红黏土两部分组成,通过颗粒对比分析,确认 2.6 Ma ~ 7 Ma 红黏土的成因与黄土一样,同属于风成堆积^[5]。连续的黄土覆盖在红黏土之上,最早的红黏土形成的年代可追溯到 22 Ma,位于六盘山以南的秦安县^[6]。在鄂尔多斯黄土高原,黄土与红黏土的分界面大约在 2.6 Ma,风尘堆积由红土转为黄土被认为是由气候原因造成的,是暖湿变为冷干的转折点^[7],黄土源区的化学风化呈逐步减弱的趋势,并与同一时期全球冰量逐步增长的趋势相吻合,Chen 等^[8]认为第四纪以来亚洲内陆地区的干旱化现象可能是全球气候变化的区域响应的结果。一些学者认为红黏土表示东南向夏季风盛行,而黄土表示冬季风强劲^[7]。红黏土与黄土的差别在于,红黏土颗粒的表面吸附着一些铁质黏粒胶膜,在斜照光下泛红色^[9]。研究发现,灵台剖面红黏土与黄土的平均总铁含量分别为 6.0% 和 5.5%,虽然红黏土中铁含量比黄土中仅高出约 0.5%,但是由于红黏土中多出的 Fe^{2+} 基本上都以 Fe_2O_3 胶膜的形式存在,铁质或铁锰胶膜吸附在风尘颗粒表面,这是土壤呈现红色的根本原因。红黏土中的铁锰胶膜含量与粒径有关,例如,在延长和伊川剖面全氧化铁含量范围为 4.5% ~ 5.7%,而在渭南段变化范围为 5% ~ 6.5%,意味着总铁含量明显受到了黄土粒径的控制,粒径越小,红土中的铁含量越高^[10]。铁质胶膜的来源一般认为与土壤的淋溶有关,土壤中 Ca、Na、Sr、Si 等被降水淋溶流

失^[11],氧化铁被还原成为 Fe^{2+} 溶入水中,水中的 Fe^{2+} 与空气中的 O_2 发生氧化反应生成 Fe_2O_3 胶膜沉淀^[2]。但是,在黄土与红黏土堆积层中并没有找到水流运动的证据,相反,蜗牛种类的分布表明,黄土与红黏土中没有发生过水流的垂向流动,在黄土与红土中发现的蜗牛种类相似,表明气候环境相同^[12]。

虽然关于红土成因已经研究了多年,但学术界至今未得出一致结论,红土成因仍存在争议。关于鄂尔多斯高原红土的成因存在 3 种不同的观点:①晚第三纪的气候为暖湿,而第四纪为冷干^[7],红土表面吸附的铁锰物质来自土壤的淋溶,红土是暖湿气候的产物^[1];②红黏土序列物质主要来源于风力携带的粉尘,以“覆盖式”披盖在原始地貌上,粉尘在风力和水流作用下被搬运堆积^[13];③红土的形成与气候变化无关,吸附在红土颗粒表面的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等离子来自玄武岩等岩浆岩,超临界态的深循环地下水通过“气孔”进入到玄武岩中,将“气孔”周边玄武岩中 Fe、Mg、Mn、Ca 等元素萃取,于是,带有“气孔”的玄武岩被超临界水萃取成为孔洞型玄武岩。被萃取出的 Fe、Mg、Mn、Ca 等随着热液涌出地表形成矿物沉积,红土与黄土中保留的磁化率、碳酸盐等古气候信息反映的应该是深循环地下水补给源区的水温与水量等信息^[14]。

黄土高原物质来源与风积土的观点已经得到了地学界的普遍认同,但是,黄土高原沉积物中有 3% ~ 10% 的 CaCO_3 不是来自风尘物质,而是来自降水或地下水^[15]。陈建生等^[16]通过 CaCO_3 平衡关系,确定黄土高原多出的 CaCO_3 来自地下水,深循环地下水中溶解的 CaCO_3 浓度高,地下水在溢出地表的过程中由于压力降低引起了 CaCO_3 饱和浓度的降低,从而形成了 CaCO_3 沉积,深循环地下水维系了风尘颗粒的连续堆积,最终形成了黄土高原。中国地质调查局经过大规模抽水试验证实,鄂尔多斯是个大水盆,地下水的年补给量达到 $1.05 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[17]。通过降水入渗试验与同位素分析等研究确认,补给鄂尔多斯盆地的地下水来自外源水^[18-19],西藏高原的河流与湖泊存在渗漏^[20],纳木错湖泊的渗漏量达到 $120 \sim 190 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[21];重力卫星数据表明,2003—2009 年期间,西藏高原地下水的增加量达到 $1.86 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ^[22]。由于鄂尔多斯等地下水的排泄区中沉积了 Fe(红土)、Mg(白云岩)等矿物,表明深循环地下水曾经为高温,Fe、Mg 等元素来自地幔,而且地

慢导水通道一直延续至今,地下水维系了风尘颗粒的连续堆积,早期的热水形成了红土^[14,23]。

2 阿拉善自流井水红化地层分析

巴丹吉林沙漠位于内蒙古西部,总面积 $4.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,降水量小于 100 mm ,但沙漠中仍然保留着 100 多个湖泊以及世界上最高的沙山群,通过原位植物化石研究证实,几千年以来沙山群与湖泊很稳定,没有发生过位移,地下水维系了沙山与湖泊景观^[24]。根据地下水深循环理论,在南部沙漠边缘沙山覆盖的火山口周边的盆地中找到了优质的饮用水源地,8 口井的总流量接近 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中锶含量达到了矿泉水标准^[25]。在巴丹吉林沙漠北部发现了第四纪火山喷发遗迹,孔洞型玄武岩出露地表,火山口附近分布着红土与碳酸盐(白云岩)地层(图 1)。红化地层主要分布在圆帽山(图 1(a)),在圆帽山的顶部及四周分布着较厚的碳酸盐层,圆帽山周边盆地并没有红化地层与碳酸盐层,所以,红土不可能来自风尘或冲洪积。

2015 年 8 月在巴丹吉林沙漠北部地区钻了一口自流井,位置 $41^\circ 47' 60'' \text{N}$, $104^\circ 1' 33'' \text{E}$,自流井与火山玄武岩喷发区距离约 85 km ,自流井位置见图 1(b)。自流井最初的涌水量为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$,2 个月以后涌水量衰减到 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 。一般地下水中的 Fe 质量浓度都小于 0.1 mg/L ,但自流井中 Fe^{2+} 质量浓度达到 1.6 mg/L ,远远高出了均值。自流井水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子含量也偏高, HCO_3^- 的质量浓度达到 968 mg/L ,远远高出一般地下水,因

为水中碳酸盐的饱和浓度与压力呈正相关,水中大量的 HCO_3^- 表明地下水来自深部地层,浅层地下水碳酸盐的饱和浓度低,不可能有这么高的含量,这表明地下水经历了深循环过程。

自流井深 150 m ,井水温度始终保持为 21°C ,通过水化学分析确定地下水经历了深循环。自流井位于巴丹吉林沙漠北部的极干旱区,钻井位于丘陵地区,山盆之间的最大高差只有几十米。自流井水的 δD 和 $\delta^{18} \text{O}$ 值分别为 -78.9‰ 和 -10.8‰ ,2013—2015 年阿拉善右旗与雅布赖降水中 δD 和 $\delta^{18} \text{O}$ 的加权平均值分别为 $(-25.48\text{‰}, -4.72\text{‰})$ 和 $(-19.8\text{‰}, -3.34\text{‰})$ 。自流井水的同位素比当地降水明显贫化,自流井水显然不是来源于当地的降水。自流井不但具有稳定的补给源,而且补给源区应该在海拔较高的高原地区,根据降水同位素特征可以确定自流井可能的补给源区在青藏高原北缘一带。自流井位于火山活动形成的丘陵地区,周边的沙漠区在第四纪发生过玄武岩喷发,在源区与排泄区之间应该存在渗透系数较大的导水构造,导水层富含 Ca、Mg、Si、Fe 等元素,由此推断,深循环地下水的导水构造可能是孔洞型玄武岩。

自流井水涌出井口后汇聚在了井口周围的洼地中,2015 年 10 月,自流井涌水 2 个月之后,发现洼地中土壤的颜色已经变成了暗红色(图 1(e)、(f)),化学成分分析发现,土壤发现了 CaCO_3 沉积,在土颗粒的表层吸附了一层 Fe_2O_3 胶膜,这是土壤红化的根本原因。由于地下水在含水层流动过程中受到了介质的摩擦阻力,动水压力水头损失较大,长距



注:(a) 沙漠北部红土/碳酸盐(白云岩)地层;(b) 火山玄武岩喷发、红土/碳酸盐、自流井位置图;(c) 沙漠北部裸露的孔洞型火山玄武岩;(d) 沙漠北部红土/碳酸盐地层;(e) 2015 年 8 月自流井及周边地貌;(f) 2015 年 10 月自流井涌水造成了红色地层与碳酸盐沉积。

图 1 巴丹吉林沙漠孔洞玄武岩/红土/碳酸盐(白云岩)及自流井

离传输的地下水在孔隙或裂隙介质中水头损失较大, 自流井的衰减系数较大, 不可能维持很长的时间。水力学与地球化学分析结果都表明, 地下水所经过的介质可能是渗透性很强的孔洞型玄武岩, 由于玄武岩由 SiO_2 、 Si_2O_3 、 FeO 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 等组成, 自流井水中的 Fe^{2+} 可能来自玄武岩。这个事例表明, 红土或红层中的铁质薄膜可能是来自地下水, 地下水中的 Fe^{2+} 与空气中的 O_2 发生了氧化反应, 形成了 Fe_2O_3 胶膜, 铁质胶膜吸附在土颗粒的表面, 如果铁质胶膜量很大, 地层将被染成红色。

3 红土-黄土高原沉积原因分析

阿拉善自流井周边地层被地下水红化的事实表明, 北方的红土堆积可能并非是气候原因。鄂尔多斯盆地的地下水来自外源水补给, 鄂尔多斯盆地内部存在自流井群, 陕西府谷一口自流井的流量达到 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 每天的排泄量相当于一个中型水源地。研究表明, 鄂尔多斯地下水的补给源区在西藏内流区, 河流与湖泊的渗漏水通过深循环形式补给黄土及沙漠地区^[18-19, 23]。鄂尔多斯盆地上涌的地下水形成了浅水湖泊, 来自北方的风尘颗粒沉积在浅水湖泊, 湖泊被填充后, 地下水以土壤薄膜水的形式继续向地表排泄, 风尘颗粒被地下水黏滞成团簇结构, 抵抗风蚀的能力大幅度增强, 地下水维系了风尘颗粒的连续堆积从而形成了黄土高原^[16]。

研究发现, 长白山天池及周边的地下水来源于西藏羌塘河流的渗漏水, 上地幔的高导低速层被认为是深循环地下水的导水通道^[14, 26]。在青藏高原与鄂尔多斯上地幔存在连续的高导低速结构^[27], 高导低速结构经过了鄂尔多斯岩石圈底部后在鄂尔多斯与华北地块交界的山西裂谷处上隆弯曲, 中地壳的高导低速结构也出现了上隆^[28]。如果深循环地下水的导水通道是在上地幔的高导低速层中, 那么早期在高导低速层中流动的地下水应该被加热成为超临界水 (supercritical water, SCW), SCW 对玄武岩等岩浆岩具有超强的萃取作用, 所以, 早期上涌地下水中 Fe^{2+} 质量浓度很高, Fe^{2+} 与 O_2 发生的氧化反应生成的铁质胶膜吸附在风积颗粒的表面, 土壤被染成红色。

虽然目前对于上地幔导水通道的形成机制尚不是很清楚, 但是, 早期在上地幔中循环的地下水必然被岩浆岩加热为 SCW。由于水在超临界态时的电离度与标准状态时不同, 当 SCW 的温度在 1000°C 以上, 其密度可达到 2 g/mL , 此时的 SCW 变成了一种导电性很强的离子性流体, 具有了几乎是无坚不摧的强腐蚀性^[29], 水的电离度是常温水的 1000 倍,

H^+ 和 OH^- 的浓度均升高了 1000 倍, 具有极强的腐蚀性^[30]。萃取在临界温度附近最为严重, 且多是孔蚀与晶界溶蚀, 有时也会发生应力腐蚀开裂^[31]。

在上地幔中 SiO_2 、 FeO 与 MgO 的丰度分别为 42.62% 、 14% 与 30.54% , 这 3 种化合物占到地幔总量的 87.16% ^[32], 属于相对容易腐蚀的化合物。而地幔中 Al_2O_3 (丰度为 5.54%) 等化合物属于耐腐蚀的化合物^[33]。由于萃取程度上的差异, 地幔岩石圈导水通道中大量的 Si 、 Mg 、 Fe 等元素被 SCW 萃取, 形成一些孔蚀, 萃取后的岩浆岩成了导水的孔洞构造, 这种孔洞构造的岩浆岩应该就是在火山岩地区看到的“气孔”玄武岩, 但是, 这些“气孔”已经不是由 H_2O 、 CO_2 等“气体”所留下来的, 而是经历了超临界水的萃取作用。

从理论上讲, 上地幔中如果存在着导水通道, 那么导水通道形成后该通道上覆的岩石圈将被冷却, 该地区的地温梯度必将大幅度降低。事实上, 13.5Ma 以来, 羌塘及其周边地区的确发生了一系列快速冷却事件^[34], 在 $9\text{M} \sim 13\text{Ma}$ 青藏高原东南边界的川滇高原发生了快速冷却事件^[35]; 在 $8\text{M} \sim 9\text{Ma}$ 羌塘盆地两条断裂带发生了冷却事件^[36]; 8Ma 西藏念青唐古东南发生了突然冷却事件^[37]; 积石山在 8Ma 前后达到最高温度, 随后发生冷却^[38]; 六盘山在 $7.3\text{M} \sim 8.2\text{Ma}$ 地温梯度从 $43^\circ\text{C}/\text{km}$ 突然降低到 $16^\circ\text{C}/\text{km}$ ^[39]; 山西沁水盆地中新世以来地温梯度由每 100m 4.2°C 演变到接近现代地温场的每 100m 3°C 左右^[40]; 鄂尔多斯盆地中新世末期以来温度快速降至常温 20°C 左右^[41]。鄂尔多斯黄土高原最初大规模风尘堆积的时间为 8.35Ma ^[16], 鄂尔多斯地温梯度下降的时间与黄土高原堆积的时间是相吻合的, 岩石圈降温的时间正好是深循环地下水溢出的时间。鄂尔多斯河流源区的地温梯度普遍偏低, 例如渭河 (每 100m 1°C)、泾河 (每 100m 1.01°C)、洛河 (每 100m 1.3°C)、桑干河 (每 100m 7.1°C) 等的地温梯度都远远小于每 100m 3°C 的均值^[23], 符合外源水经过深部岩石圈循环的地温梯度特征。

8Ma 以来, 鄂尔多斯的地温梯度经历了下降过程, 在降温的同时发生了风尘的连续堆积, 风尘堆积的原因是由于深循环地下水涌至地表, FeO 与 MgO 被 SCW 萃取后还原为 Fe^{2+} 与 Mg^{2+} , Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子溢出到地表后发生了 3 种物理化学作用: ①溢出地表的地下水黏滞了风尘颗粒, 形成了连续的堆积; ② Fe^{2+} 溢出地表后形成了铁质胶膜, 将风尘颗粒染成了红色, 形成了红土高原; ③ Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 发生白云岩化, 生成白云石。由于地幔导水通道在深循环地下水的冷却作用下温度不断降低, 当

温度低于临界点,深循环地下水对岩石的萃取能力大幅度降低,地下水中 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子含量也大幅度降低,铁质胶膜大幅度减少,风尘演变为黄土堆积。由此可知,黄土高原 2.5Ma 黄土与红土的分界面并非是气候变化的产物。

4 黄土沉积全氧化铁与深海氧同位素相关性

Heller 等^[42]指出,黄土高原洛川 2.4 Ma 以来黄土剖面的磁化率与深海氧同位素具有很高的相关性,黄土的磁化率反映了古气候变化。但是 Kent^[43]指出,深海沉积物的天然剩余磁化强度 (natural remanent magnetization, NRM) 的变化是受 CaCO_3 含量的变化以及初始磁化率所显示的沉积物的磁学性质变化的影响,地球磁场强度变化与气候变化之间并无相关性。由黄土高原磁化率与深海氧同位素高度相关可知,黄土高原的磁化率与全球降水量高度相关;但是,这种相关性仅限于黄土高原,美国阿拉斯加与西伯利亚的黄土中的磁化率与降水量之间并不存在相关性^[16]。

地下水深循环理论可以更合理解释黄土高原 2.4 Ma 以来磁化率变化与全球降水量高度相关的原因。通过对比黄土高原沉积地层中的全氧化铁、 CaCO_3 与深海 $\delta^{18}\text{O}$ 发现,它们之间存在着很好的对应关系。这是由于沉积在黄土中的 CaCO_3 与吸附在风尘颗粒表面的 Fe^{2+} 等离子都来自深循环地下水,黄土高原的地下水补给来自青藏高原^[18-19,44]。由于全球的冰量与温度呈负相关,深海氧同位素与

全球冰量呈正相关,降水量与全球冰量呈负相关。从岩石中萃取出来的离子含量与水量呈正相关,由此可知,黄土高原沉积层中的 CaCO_3 、铁质胶膜与深海 $\delta^{18}\text{O}$ 呈负相关(图 2)^[45-47]。

但是,铁质胶膜层都位于 CaCO_3 层的上部(图 2),这是由于 CaCO_3 的溶解度与压力呈正相关,深循环地下水中 CaCO_3 的溶解度较大,地下水涌到地表附近,压力降低造成 CaCO_3 的溶解度下降,从而在地表以下形成了 CaCO_3 沉积。而深循环地下水中的 Fe^{2+} 必须达到地表后才能与空气中的 O_2 发生氧化反应形成 Fe_2O_3 沉积,所以,铁质胶膜一定位于 CaCO_3 层的上部。

由于地下水深循环与新生代火山玄武岩喷发有关,地下水深循环初期阶段大量的 Fe、Mg、Mn 等元素被萃取,在地表形成了白云岩、红土或红色地层。新生代火山岩喷发地区及一些岩浆流经过地区的地表红层可能是深循环的 SCW 上溢的结果,不是气候变化的产物。据此推断,南方的红土年代晚于北方的原因是由于这些地区出现地下水深循环的年代晚于鄂尔多斯,出现在第四纪。

鄂尔多斯、内蒙古高原、华北平原及长白山等地区地下水中的氡氧同位素具有贫化特征,地下水接受青藏高原河流或湖泊渗漏水的补给^[14,23,48]。羌塘中部地区则广泛分布了低速物质,羌塘中部的低速体可延伸到 400 km 深度以下,大范围的 Sn 波缺失,电阻在 10 ~ 30 Ω 之间^[49-50];羌塘盆地 150 km 以下的岩石圈中存在连续的高导低速层并延伸到东部地

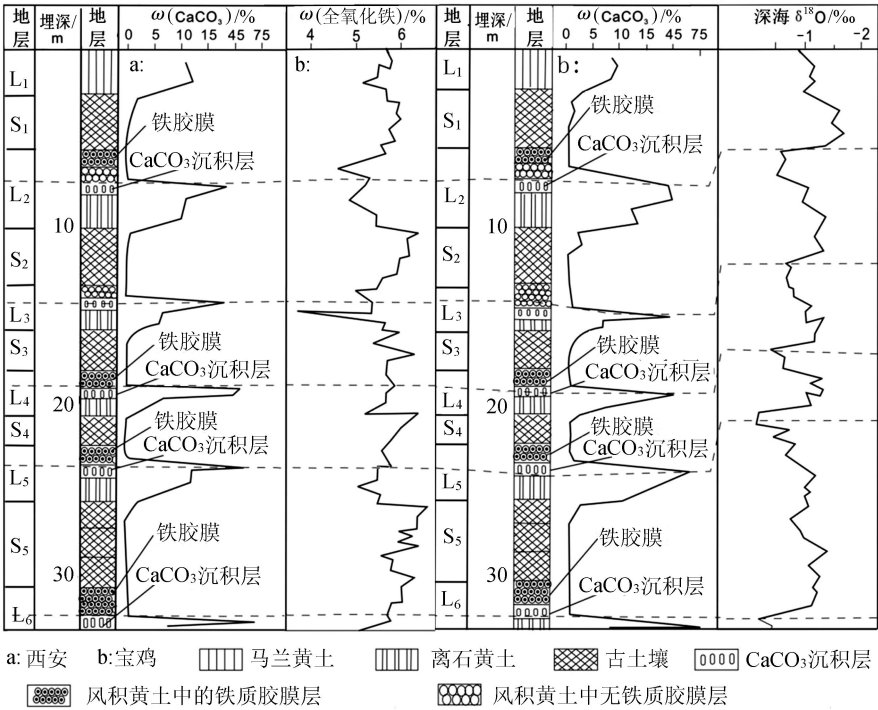


图 2 西安、宝鸡黄土中的全氧化铁、 CaCO_3 与深海 $\delta^{18}\text{O}$ 的对应关系

区,上地幔第一高导低速层经过了鄂尔多斯地块并继续向东部延伸^[51],该低速结构经过鄂尔多斯岩石圈底部后,在鄂尔多斯与华北地块交界的山西裂谷处上隆弯曲,上地幔与中地壳的高导低速结构在裂谷下部都出现了上隆^[27]。考虑到上地幔中富含Fe、Mg等金属元素,通过分析鄂尔多斯沥青包裹体中的钐-钕同位素得出,深部物质可能与大陆高原玄武岩有关^[52],据此推断上地幔高导低速层可能是由孔洞玄武岩组成,正是深循环地下水的导水通道。

5 结 论

a. 地下水存在一种深循环形式,上地幔中的高导低速层中可能存在导水通道,西藏高原等地的河流与湖泊通过火山裂谷、断裂带等渗漏到不同的地幔导水通道中,分别在鄂尔多斯、华北平原、内蒙古高原、长白山等地区排泄。

b. 阿拉善自流井水来自外源区,井水周边的土壤被涌出水中的铁离子染成红色,表明北方地区的红土或红色地层可能与深循环地下水有关,吸附在土颗粒表面的铁锰胶膜可能来自地下水而不是土壤淋溶的产物,红土的形成不是气候原因。

c. 深循环地下水通过断裂带在鄂尔多斯盆地排泄是形成黄土高原的根本原因,地下水维系了风尘颗粒的连续堆积,早期溢出地表的深循环水为SCW,被SCW萃取出的 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等离子形成了碳酸盐(白云石)与红(色)土;大约在2.5 Ma,深循环导水通道的温度降低到超临界态以下,玄武岩等被萃取的程度大幅度降低, Fe^{2+} 大幅度减少后风尘堆积呈现为黄(色)土。

d. 深海沉积物氧同位素 $\delta^{18}O$ 变化反映了全球冰量的变化, $\delta^{18}O$ 偏负表明全球的温度与降水量偏高;液态的深循环地下水量越大,从岩石中萃取出的碳酸盐与铁离子的含量越高,所以,黄土高原沉积层中碳酸盐、全氧化铁与深海 $\delta^{18}O$ 呈高度负相关。

参考文献:

[1] 黄镇国,张伟强,陈俊鸿. 中国红土与自然地带变迁[J]. 地理学报,1999,54(3):193-203. (HUANG Zhenguo,ZHANG Weiqiang,CHEN Junhong. The change of natural zones and the evolution of red earth in China[J]. Acta Geographica Sinica,1999,54(3):193-203. (in Chinese))

[2] 黄镇国. 中国南方红色风化壳[M]. 北京:海洋出版社,1996.

[3] 李吉均,文世宣,张青松,等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨[J]. 中国科学,1979(6):608-616. (LI Jijun,WEN Shixuan,ZHANG Qingsong,et al. Discussion

on the time, amplitude and form of the uplift of the Qinghai Tibet Plateau[J]. Scientia Sinica,1979(6):608-616. (in Chinese))

[4] ROWLEY D B,CURRIE B S. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet[J]. Nature,2006,439(7077):677-681.

[5] 丁仲礼,杨石岭,孙继敏. 2.6Ma 前后中国北方大气环流格局的重组:黄土-红黏土序列的粒度证据[C]//陈颃,王水,秦蕴珊,等. 寸丹集:庆贺刘光鼎院士工作50周年学术论文集. 北京:科学出版社,1998:884-897.

[6] GUO Z T, RUDDIMAN W F, HAO Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China[J]. Nature,2002,416(6877):159-163.

[7] 丁仲礼,孙继敏,朱日祥,等. 黄土高原红黏土成因及上新世北方干旱化问题[J]. 第四纪研究,1997,17(2):147-157. (DING Zhongli,SUN Jimin,ZHU Rixiang,et al. Eolian origin of the red clay deposits in the Loess Plateau and implications for Pliocene climatic changes[J]. Quaternary Sciences,1997,17(2):147-157. (in Chinese))

[8] CHEN J, LIU L, JUNFENG J I, et al. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian inland[J]. Science China Earth Sciences,2001,44(5):403-413.

[9] 安芷生,魏兰英. 淀积铁质黏粒胶膜及其成因意义[J]. 科学通报,1979,24(8):356-359. (AN Zhisheng,WEI Lanying. Deposition of iron clay film and its genetic significance[J]. Chinese Science Bulletin,1979,24(8):356-359. (in Chinese))

[10] DING Z L, YANG S L, SUN J M, et al. Iron geochemistry of loess and red clay deposits in the Chinese Loess Plateau and implications for long-term Asian monsoon evolution in the last 7.0 Ma[J]. Earth and Planetary Science Letters,2001,185:99-109.

[11] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等. 元素地球化学[M]. 北京:科学出版社,1984:50-112.

[12] 裴云鹏,吴乃琴,李丰江. 晚第三纪红黏土成因和沉积环境的生物学证据:蜗牛化石记录[J]. 科学通报,2004,49(13):1294-1298. (PEI Yunpeng,WU Naiqin,LI Fengjiang. Late tertiary red clay formation and the sedimentary environment of biological evidence:snail fossil record[J]. Chinese Science Bulletin,2004,49(13):1294-1298. (in Chinese))

[13] YUE L P, LI J X, ZHENG G Z, et al. Evolution of the Ordos Plateau and environmental effects[J]. Science China Earth Sciences,2007,50(2):19-26.

[14] 陈建生,江巧宁. 地下水深循环研究进展[J]. 水资源保护,2015,31(6):8-17. (CHEN Jiansheng,JIANG Qiaoning. Research progress of ground water deep

- circulation[J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(6): 8-17. (in Chinese))
- [15] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 中国科学出版社, 1985.
- [16] 陈建生, 刘震, 刘晓艳, 等. 深循环地下水维系黄土高原风尘颗粒连续沉积[J]. *地质学报*, 2013, 87(2): 278-287. (CHEN Jiansheng, LIU Zhen, LIU Xiaoyan, et al. Deep-circulation groundwater maintains continuous deposition of dusty particles in Loess Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(2): 278-287. (in Chinese))
- [17] 侯光才, 张茂省, 王永和, 等. 鄂尔多斯盆地地下水资源与开发利用[J]. *西北地质*, 2007, 40(1): 7-34. (HOU Guangcai, ZHANG Maosheng, WANG Yonghe, et al. Groundwater resources of the Ordos Basin and its development and utilization [J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(1): 7-34. (in Chinese))
- [18] CHEN J, LIU X, WANG C, et al. Isotopic constraints on the origin of groundwater in the Ordos Basin of northern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(2): 505-517.
- [19] GE J, CHEN J, GE L, et al. Isotopic and hydrochemical evidence of groundwater recharge in the Hopq Desert, NW China [J]. *Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry*, 2016, 310(2): 761-775.
- [20] 陈传友, 关志华. 羌塘高原水资源及其开发利用[J]. *自然资源学报*, 1989, 4(4): 8-14. (CHEN Chuanyou, GUAN Zhihua. The water resources of the Qiang-Tang Plateau and their development and use [J]. *Journal of Natural Resources*, 1989, 4(4): 8-14. (in Chinese))
- [21] ZHOU S, KANG S, CHEN F, et al. Water balance observations reveal significant subsurface water seepage from Lake Nam Co, south-central Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 491: 89-99.
- [22] XIANG L, WANG H, STEFFEN H, et al. Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2016, 449: 228-239.
- [23] 陈建生, 王庆庆. 北方干旱区地下水补给源问题讨论[J]. *水资源保护*, 2012, 28(3): 1-8. (CHEN Jiansheng, WANG Qingqing. A discussion of groundwater recharge sources in arid areas of North China [J]. *Water Resources Protection*, 2012, 28(3): 1-8. (in Chinese))
- [24] CHEN J S, LI L, WANG J Y, et al. Water resources: groundwater maintains dune landscape [J]. *Nature*, 2004, 432(7016): 459-60.
- [25] 郑晋鸣. 河海大学科研团队在沙漠中找到矿泉水[N]. *光明日报*, 2015-01-02(7).
- [26] 江巧宁, 陈建生. 深循环地下水补给长白山天池的水量平衡分析[J]. *水资源保护*, 2015, 31(5): 7-13. (JIANG Qiaoning, CHEN Jiansheng. Analysis on water balance of deepcycle groundwater supplying Tianchi Lake of Changbai Mountain [J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(5): 7-13. (in Chinese))
- [27] 徐常芳. 中国大陆地壳上地幔电性结构及地震分布规律(一) [J]. *地震学报*, 1996(2): 254-261. (XU Changfang. The electrical structure of crust and upper mantle and its distribution in China [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1996(2): 254-261. (in Chinese))
- [28] 李立. 大地电磁测深(MTS)用于研究地壳上地幔的初步成果. 物探与化探[J], 1997, 21(6): 460-467. (LI Li. The preliminary achievements of magnetotelluric sounding in the study of the crust and upper mantle [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1997, 21(6): 460-467. (in Chinese))
- [29] 梁京梅, 李复兴. 超临界水: 一种新的化学介质[J]. *化学教育*, 2001, 22(6): 7-9. (LIANG Jingmei, LI Fuxing. Supercritical water: a new chemical medium [J]. *Chinese Journal of Chemical Education*, 2001, 22(6): 7-9. (in Chinese))
- [30] 宋心琦. 神奇的超临界态水[J]. *百科知识*, 2011(2): 3-5. (SONG Xinqi. Magic supercritical water [J]. *Encyclopedic Knowledge*, 2011(2): 3-5. (in Chinese))
- [31] BOUKIS N, CLAUSSEN N, EBERT K, et al. Corrosion screening tests of high-performance ceramics in supercritical water containing oxygen and hydrochloric acid [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 1997, 17(1): 71-76.
- [32] 黎彤, 袁怀雨. 大洋岩石圈和大陆岩石圈的元素丰度[J]. *地球化学*, 2011, 40(1): 1-5. (LI Tong, YUAN Huaiyu. Element abundance in the oceanic and the continental lithospheres [J]. *Geochimica*, 2011, 40(1): 1-5. (in Chinese))
- [33] BOUKIS N, KRITZER P. Corrosion phenomena on alloy 625 in aqueous solutions containing hydrochloric acid and oxygen under subcritical and supercritical conditions [J]. *Nace International Houston Tx*, 1997.
- [34] BLISNIUK P M, HACKER B R, GLODNY J, et al. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago [J]. *Nature*, 2001, 412: 628-632.
- [35] CLARK M K, SCHOENBOHM L M, ROYDEN L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of Eastern Tibet from large-scale drainage patterns [J]. *Tectonics*, 2004, 23: TC1006, doi:10.1029/2002TC001402.
- [36] MOLNAR P. Mio-Pliocene growth of the Tibetan Plateau and evolution of East Asian climate [J]. *Palaeontologia Electronica*, 2005, 8(1): 1-23.
- [37] HARRISON T M, COPELAND P, KIDD W S F, et al. Activation of the Nyainqentanghla shear zone: implications for uplift of the southern Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 1995, 14: 658-676.

(下转第 37 页)

- [J]. China Water Resources, 2004 (17): 20-23. (in Chinese))
- [8] AZIZ O I A, BURN D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2006, 319(1/4): 282-294.
- [9] 王学雷,姜刘志. 三峡工程蓄水前后长江中下游环境流特征变化研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2015, 49(5): 798-804. (WANG Xuelei, JIANG Liuzhi. Study on environmental flow change in the middle-lower Yangtze River before and after the impoundment of the Three Gorges Dam [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2015, 49(5): 798-804. (in Chinese))
- [10] 付晓花,董增川,山成菊,等. 人类活动干扰下的滦河河流生态径流变化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 263-267. (FU Xiaohua, DONG Zengchuan, SHAN Chengju, et al. Analysis of ecological
- instream runoff of Luanhe River under the interference of human activities[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 263-267. (in Chinese))
- [11] YOO C. Long term analysis of wet and dry years in Seoul, Korea [J]. Journal of Hydrology, 2006, 318(1/2/3/4): 24-36.
- [12] 郝兴明,李卫红,陈亚宁,等. 塔里木河干流年径流量变化的人类活动和气候变化因子甄别[J]. 自然科学进展, 2008, 18(12): 1409-1416. (HAO Xingming, LI Weihong, CHEN Yaning, et al. Study on identification of human activity and climate change on annual runoff variation in the Tarim River Basin [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(12): 1409-1416. (in Chinese))

(收稿日期:2016-12-06 编辑:徐娟)

(上接第7页)

- [38] 郑德文,张培震,万景林,等. 构造、气候与砾岩:以积石山和临夏盆地为例[J]. 第四纪研究,2006,26(1):63-69. (ZHENG Dewen, ZHANG Peizhen, WAN Jinglin, et al. Tectonic events, Climate and Congelomorate; example from Jishishan Mountain and Linxia basin [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 63-69. (in Chinese))
- [39] 郑德文,张培震,万景林,等. 六盘山盆地热历史的裂变径迹证据[J]. 地球物理学报,2005,48(1):157-164. (ZHENG Dewen, ZHANG Peizhen, WAN Jinglin, et al. Apatite fission track evidence for the thermal history of the Liupanshan basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 157-164. (in Chinese))
- [40] 承金,汪新文,王小牛. 山西沁水盆地热史演化特征[J]. 现代地质,2009,23(6):1093-1099. (CHENG Jin, WANG Xinwen, WANG Xiaoni. The theimal history of the Qinshui Basin in Shanxi Province [J]. Geoscience, 2009, 23(6): 1093-1099. (in Chinese))
- [41] 刘武生,秦明宽,漆富成,等. 运用磷灰石裂变径迹分析鄂尔多斯盆地周缘中新代沉降隆升史[J]. 铀矿地质, 2008, 24(4): 221-232. (LIU Wusheng, QIN Mingkuan, QI Fucheng, et al. Analysis on the Meso-Neozoic subsidence and uplift history of theperiphery of Ordos basin using apatite fission track [J]. UraniumGeology, 2008, 24(4): 221-232. (in Chinese))
- [42] HELLER F, LIU T. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China [J]. Nature, 1982, 300(5891): 431-433.
- [43] KENT D V. Apparent correlation of palaeomagnetic intensity and climatic records in deep-sea sediments[J]. Nature, 1982, 299(5883): 538-539
- [44] 陈建生,王婷,陈茜茜,等. 鄂尔多斯自流盆地地下水来源争议问题讨论[J]. 地质论评, 2013, 59(5): 900-908. (CHEN Jiansheng, WANG Ting, CHEN Qianqian, et al. Discussion on the origin of groundwater in the Orodos basin [J]. Geological Review, 2013, 59(5): 900-908. (in Chinese))
- [45] SHACKLETON N J, OPDYKE N D. Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of pacific core V28-239 late pliocenotocene geol [J]. Geol Soc Amer Men, 1976, 145, 449-464.
- [46] 赵景波. 淀积理论与黄土高原环境演变[M]. 北京:科学出版社, 2002:19.
- [47] 孙建中,赵景波. 黄土高原第四纪[M]. 北京:科学出版社, 1991:122.
- [48] 陈建生,陈茜茜,王婷. 阿拉善沙漠湿沙层水分来源同位素示踪[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 196-206. (CHEN Jiansheng, CHEN Qianqian, WANG Ting. Isotopes tracer research of wet sand layer water sources in Alxa Desert [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 196-206. (in Chinese))
- [49] TAPPONNIER P, ZHIQIN X, ROGER F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. Science, 2001, 294: 1671-1677.
- [50] WEI Wenbo, UNSWORTH M, JONES A G, et al. Detection of widespred fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies [J]. Science, 2001, 292: 716-718.
- [51] LIU M, CUI X, LIU F. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China; a mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? [J]. Tectonophysics, 2004, 393(1/2/3/4): 29-42.
- [52] 潘爱芳,赫英. 鄂尔多斯盆地石油的稀土元素地球化学特征[J]. 中国稀土学报, 2008, 26(3): 374-380. (PAN Aifang, HE Ying. Rare earth element geochemical characteristics of oil in the Ordos basin [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2008, 26(3): 374-380. (in Chinese))

(收稿日期:2017-02-21 编辑:徐娟)