

# 宁夏红寺堡盆地萨拉乌苏组地层时代重新厘定及意义

崔加伟, 李振宏, 刘 锋, 董晓朋, 黄 婷, 赵 杨

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘 要:** 以沉积旋回划分为基础, 采用光释光和碳十四测年技术手段, 将宁夏红寺堡盆地上更新统地层时代进行了重新划分与厘定。研究结果将红寺堡盆地原定为萨拉乌苏组的湖相沉积体为上下两套, 下部湖相沉积即为传统意义上的萨拉乌苏组, 上部湖相沉积结合区域地层对比结果将其重新划归为水洞沟组, 总体上反映了晚更新世青藏高原东北缘发育的两期重要的古大湖事件。在深海大洋氧同位素曲线上这两期古大湖事件分别相当于 MIS3 与 MIS5 段, 代表了区域上两期温暖湿润的气候环境, 也与该时期全球古气候环境的变迁基本一致。同时, 在这两期古大湖发育期间, 存在一期重要的构造隆升事件, 表现为两套地层之间存在明显的区域不整合接触, 可能是青藏高原晚更新世强烈隆升的响应。因此, 针对青藏高原东北缘上更新统萨拉乌苏组湖相沉积层开展系统的年代学研究, 对其地层时代进行重新划分与厘定, 对于研究晚更新世古大湖形成与演化、古气候变迁以及青藏高原的隆升提供了重要的地质背景资料。

**关键词:** 晚更新世; 萨拉乌苏组; 水洞沟组; 古大湖; 红寺堡盆地

中图分类号: P539

文献标识码: A

## REDEFINITION OF THE SEDIMENTARY TIME OF THE SALAWUSU FORMATION IN THE HONGSIBU BASIN, NINGXIA AND ITS SIGNIFICANCE

CUI Jiawei, LI Zhenhong, LIU Feng, DONG Xiaopeng, HUANG Ting, ZHAO Yang

(Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on the detailed field profile observation and stratigraphic correlation works, we re-divide the Late Pleistocene sedimentary cycle in the Hongsibu basin, Ningxia. What's more, we also redefine the sedimentary frame of the Pleistocene in the Hongsibu basin combining with the accurate time limit from the OSL or  $^{14}\text{C}$  dating results. The lacustrine deposit of the former Salawusu formation can be subdivided into the lower part which corresponds with the traditional Salawusu formation, and the upper part which corresponds with the Shuidonggou formation according to the regional stratigraphic comparison. Overall, the sedimentary process of these two parts covered two periods in which large paleo-lakes developed at the north-eastern margin of the Tibet Plateau during the Late Pleistocene. Besides that, these two periods in which large paleo-lakes developed corresponded to the marine oxygen isotope stage 3 (MIS 3) and stage 5 (MIS 5). During these two stages, the paleoclimate around the world was warm

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160060)

作者简介: 崔加伟 (1990-), 男, 博士, 主要从事岩石学、矿物学、区域地质调查等方面的研究工作。E-mail: 1cuijiawei@163.com

通讯作者: 李振宏 (1973-), 男, 副研究员, 主要从事沉积盆地分析、石油地质综合研究、区域地质调查等方面的研究工作。E-mail: lizhenhong@126.com

收稿日期: 2017-12-28; 修回日期: 2018-02-01

范二平编辑

and wet, which means the evolution of the paleoclimate at the north-eastern margin of the Tibet Plateau took concerted action with the whole world. Moreover, there also exists a regional unconformity between these two sets of lacustrine deposits which means there developed a significant tectonic uplift during the sedimentation of these two large paleo-lakes. The tectonic uplift might have close relationship with the uplift of the Tibet Plateau during the Late Pleistocene. Therefore, the sedimentary time re-definition of the Salawusu formation is of great significance to the study of the formation and evolution of the Pleistocene large paleo-lakes, transition of the paleo-environment, and the tectonic uplift of the Tibet Plateau during the Late Pleistocene.

**Key words:** Late Pleistocene; Salawusu formation; Shuidonggou formation; large paleo-lake; Hongsibu basin

## 0 引言

上更新统萨拉乌苏组命名于内蒙古与陕西交界的萨拉乌苏河流域,是在华北地区广泛发育的一套具有代表意义的河湖相沉积,其基本地层序列传统意义上认为介于马兰组黄土与离石组黄土之间,局部与二者存在一定的穿时性。自1924年法国人P.德日进和E.桑志华在内蒙古萨拉乌苏河流域将“萨拉乌苏组”建立以来<sup>[1]</sup>,该套地层便被公认为是发育在我国北方,特别是在华北广大地区,晚更新世河湖相沉积的标准地层,并一直沿用至今。伴随着近年来第四纪地质研究的不断深入和第四纪沉积物测年技术的迅速发展,众多学者针对不同地区发育的该套河湖相沉积地层进行了重新的划分和年代测定,基本达成了共识,认为萨拉乌苏组形成于140~70 ka BP的末次间冰期,区域上可与深海氧同位素曲线第5阶段相对应<sup>[2-11]</sup>。

宁夏红寺堡盆地位于青藏高原东北缘弧形构造带前缘烟筒山构造带与大罗山—牛首山构造带之间,为一晚更新世发育的山间盆地,区内主要发育晚更新世沉积地层。宁夏回族自治区区域地质志通过区域地层对比<sup>[12]</sup>,将其统称为萨拉乌苏组,整体上代表了大罗山西缘一套河湖相沉积。目前,针对该套地层的研究尚缺乏古生物化石和年代学方面的系统依据。鉴于萨拉乌苏组在区域地层格架对比以及古环境重建上的重要性,拟以沉积旋回划分对比为基础,研究建立红寺堡盆地上更新统地层综合沉积序列,进一步采用光释光和碳十四测年技术手段,限定该套地层的沉积时代。研究成果将为萨拉乌苏组在宁夏红寺堡盆地

的命名,以及区域地层格架划分与对比提供重要的依据。

## 1 区域地质概况

青藏高原东北缘发育一系列呈北西西—北西走向且向北东凸出的弧形盆—岭构造地貌带,该带总体上向南东收敛于鄂尔多斯西南缘的六盘山构造带,向北西则发散为4列弧形地貌及其前缘伴生的断裂带与山间盆地,由南西向东北,依次为海原断裂带、香山—天景山断裂带、烟筒山断裂带与大罗山—牛首山断裂带。宁夏红寺堡盆地西临烟筒山断裂带,东接大罗山—牛首山断裂带,夹持于二者之间,其盆地沉积充填过程与相邻构造带的活动性之间存在紧密的联系(见图1)<sup>[13-20]</sup>。烟筒山断裂带总体上表现为向北东凸出的弧形,以左旋走滑为主,兼有逆冲分量。西侧由上古生界、第三系和少量中生界地层组成,东侧是新生代中宁—红寺堡沉降盆地。在青藏高原东北缘4条弧形活动断裂带中,该带相对变形较弱,靠近断层可见较为宽缓褶皱,同时有正断层发育。大罗山—牛首山断裂带是青藏高原东北缘最外侧一条边界断裂,也是青藏高原与华北地块和阿拉善地块的分界断裂。断裂南段总体呈南北向延伸,青铜峡以北转为北西—北西西走向,具有挤压逆冲兼具右行走滑特征。

晚更新世发育的红寺堡盆地,奠基于上新世末期多期侵蚀形成的古地貌背景之上,上更新统萨拉乌苏组(Qp<sup>3</sup>s)与下伏的中新统红柳沟组(N<sub>1</sub>h)之间呈明显的角度不整合接触(见图2)。中新统红柳沟组(N<sub>1</sub>h)为一套紫红色的河湖相粘土质粉砂沉积。在宁夏区域地质志地层划分方案



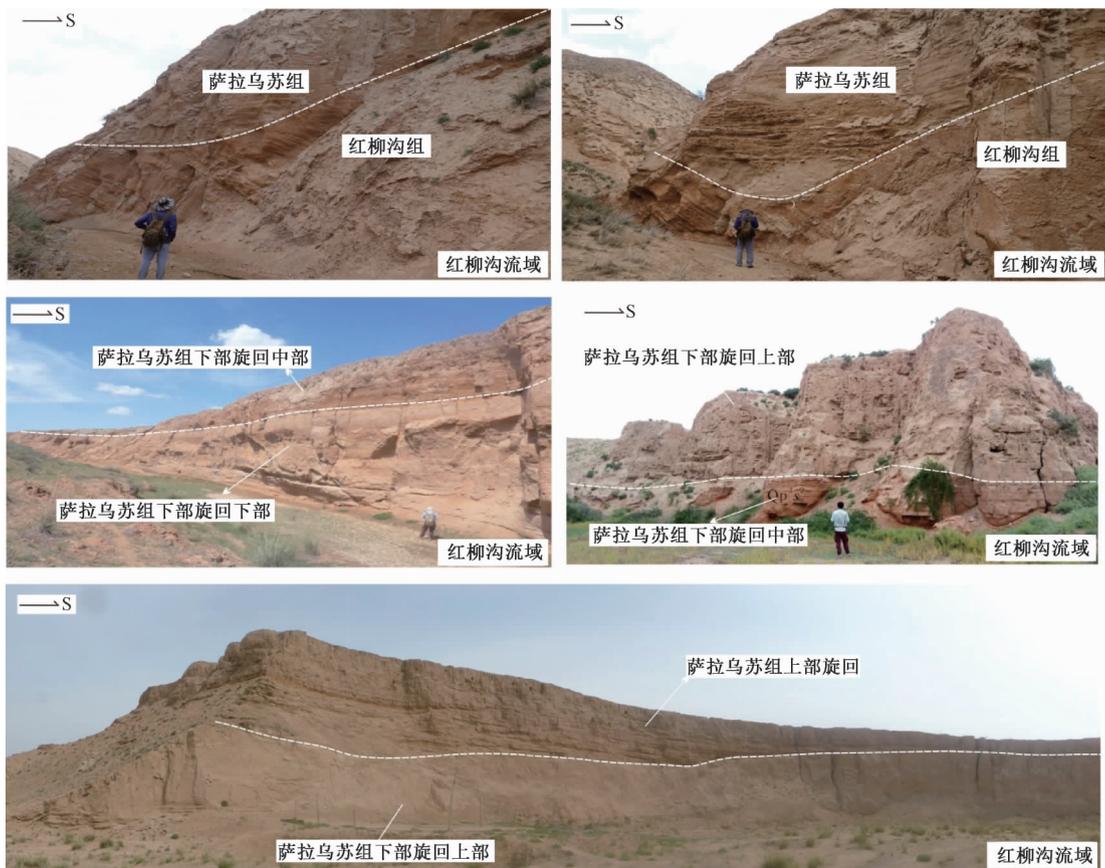


图2 宁夏红寺堡盆地地层接触关系及沉积特征典型照片

Fig. 2 Typical photos showing the contact relationship and sedimentary characteristics of the strata in the Hongsibu basin, Ningxia

测定含水量和饱和含水量, 之后将样品烘干充分研磨, 直至全部通过  $63\ \mu\text{m}$  的筛子, 供测定样品中 U、Th、K 含量。样品均为粉砂级以下, 从中选取  $4\sim 11\ \mu\text{m}$  细颗粒组分进行光释光处理。光释光辐照和信号测量均在中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室的丹麦 Risoe DA-20-C/D 型热/光释光自动测量系统上完成, 该系统的激发光源为蓝光二极管 ( $\lambda$  动测量系  $\pm 20\ \text{nm}$ )。检验长石组分所用的红外激发波长为  $830\ \text{nm}$ 。测试过程中两种光源的最大功率为  $90\%$ 。测量释光信号时蓝光的激发温度为  $125\ \text{释}$ 。释光信号通过前端置有  $3\ \text{mm}$  厚的 Hoya U-340 滤光片的 9523QB15 光电倍增管进行放大。人工辐照源为  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , 照射剂量率为  $0.088\ \text{Gy/s}$ 。计算等效剂量时, 选取前  $0.8\ \text{s}$  (前 5 个通道积分值) 减去背景值 (最后 25 个通道积分值) 的释光信号值, 进行线性或指数拟合建立光释光信号的剂量响应曲线, 即光释光生长曲线, 确定样品的等效剂量 (De) 值。样品 U、Th、K 含量在核工业北京地质研究所测定, 其中 U、Th 含量用 NexION300D 等离子体质谱仪测定,

K 含量用 Z-2000 石墨炉原子吸收分析仪测定。样品的细颗粒石英未进行  $\alpha$  系数 (即  $\alpha$  辐射产生释光信号的有效系数) 测量, 在计算年龄时, 采用  $\alpha$  系数为  $0.045 \pm 0.005$ 。碳十四样品测年在美国 BETA 实验室完成, 样品采用加速质谱仪 (AMS) 进行测试。

### 3 测试结果

9 件样品的石英光释光 (OSL) 测年结果及相关参数见表 1。图 3 给出了 HSB-OSL-7 样品细颗粒石英光释光信号衰减曲线、等效剂量生长曲线及等效剂量测定值。从样品的光释光信号衰减曲线看, 信号较强, 且呈快速衰减曲线特征, 为典型石英信号特征, 说明长石在前处理过程中已经去除干净, 测试矿物为纯石英, 且石英信号以快组分为主, 符合光释光测年的基本要求。从样品的等效剂量生长曲线来看, 均无明显饱和趋势, 其年龄可供参考。假定实验室测定的样品 U、Th 和 K 含量及含水量可以代表样品埋藏期间的 U、Th、K 含量和含水量, 样品采集时未发生曝

光, 那么表 1 中样品的 OSL 年龄代表了样品最后一次曝光距今的时间。从测试结果来看, 剖面自下而上样品的年龄依次年轻, 没有发现年龄倒转的现象。同

时, 两个碳十四样品的年龄也符合整个地层序列年龄的基本特征 (见图 4), 这一结果为光释光测年样品的有效性提供了充分的依据。

表 1 宁夏红寺堡盆地光释光年龄及其参数统计表

Table 1 Statistical table of OSL dating results of samples from Hongsibu basin, Ningxia

样品编号	U/×10 <sup>-6</sup>	Th/×10 <sup>-6</sup>	K/%	环境剂量率/ (Gy/ka)	测试粒径/ μm	测试方法	等效剂量/Gy	年龄/ka
HSB-OSL-9	2.26	8.58	1.71	3.59	4~11	SMAR	41.09±2.32	11.45±1.32
HSB-OSL-8	2.26	8.98	1.74	3.66	4~11	SMAR	70.63±4.07	19.29±2.23
HSB-OSL-7	2.04	8.76	1.88	3.70	4~11	SMAR	92.26±10.06	24.92±3.69
HSB-OSL-6	2.47	9.71	1.95	4.02	4~11	SMAR	217.80±13.65	54.12±6.39
HSB-OSL-5	2.3	9.21	1.76	3.72	4~11	SMAR	228.93±20.81	61.56±8.32
HSB-OSL-4	8.15	11.10	1.98	5.94	4~11	SMAR	472.24±33.01	79.48±9.70
HSB-OSL-3	2.94	11.90	2.38	4.70	4~11	SMAR	421.03±24.60	89.62±10.38
HSB-OSL-2	3.49	10.80	2.27	4.71	4~11	SMAR	531.08±54.01	112.64±16.07
HSB-OSL-1	2.78	7.31	1.82	3.85	4~11	SMAR	458.08±35.46	119.04±15.05

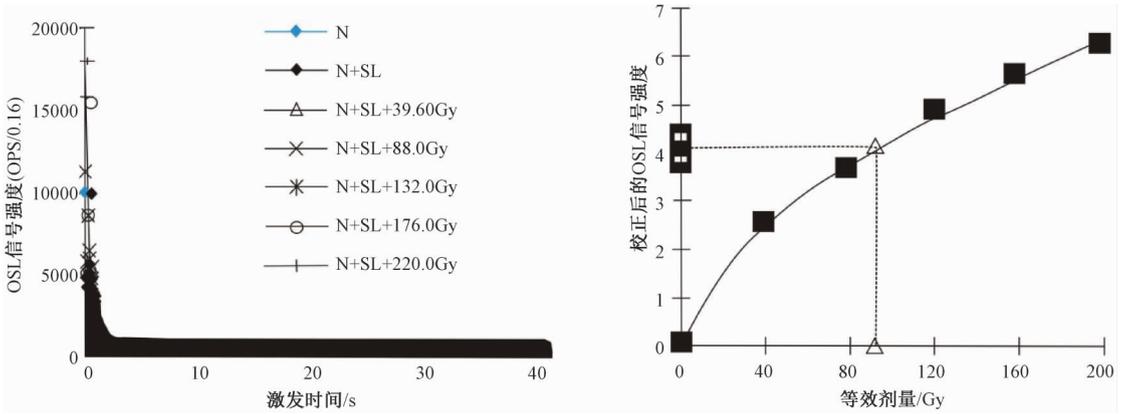


图 3 HSB-OSL-7 光释光信号衰减曲线和校正后的等效剂量生长曲线图

Fig. 3 OSL signal De distribution and equivalent dose growth curve of sample HSB-OSL-7

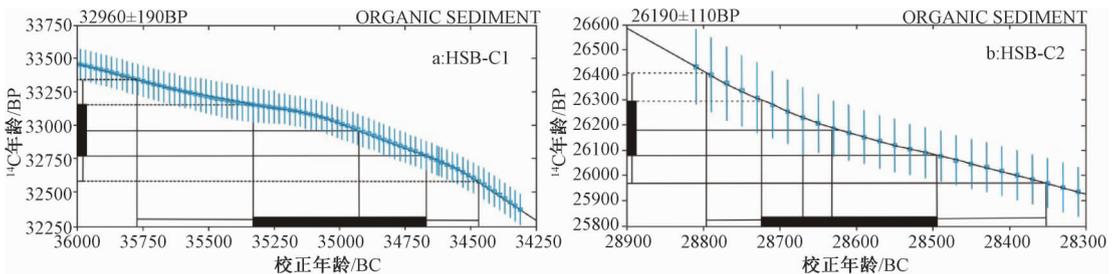


图 4 碳十四样品测年曲线图

Fig. 4 Diagrams of <sup>14</sup>C dating curves of samples from the Hongsibu basin, Ningxia

## 4 讨论

### 4.1 地层时代重新划分与厘定

最新的测年结果表明宁夏红寺堡盆地原定为萨拉乌苏组湖相层的底部年龄大于 119040 ± 1904 a, 顶部年龄为 11450 a (见图 5)。相关研究成果认为

萨拉乌苏组形成年龄为 70000 ~ 140000 a<sup>[2,6]</sup>, 水洞沟组石器层位骨化石<sup>14</sup>C 年龄为 17250 ± 250 a, 钙质结核<sup>14</sup>C 年龄为 26230 ± 800 a<sup>[13]</sup>。显然, 该套地层跨越了萨拉乌苏组和水洞沟组两期古湖的沉积时限。根据地层沉积旋回和地层之间的接触关系, 对该套地层进行了重新划分与对比研究, 认为原定为萨拉乌苏组的下部旋回在区域上正好相当于

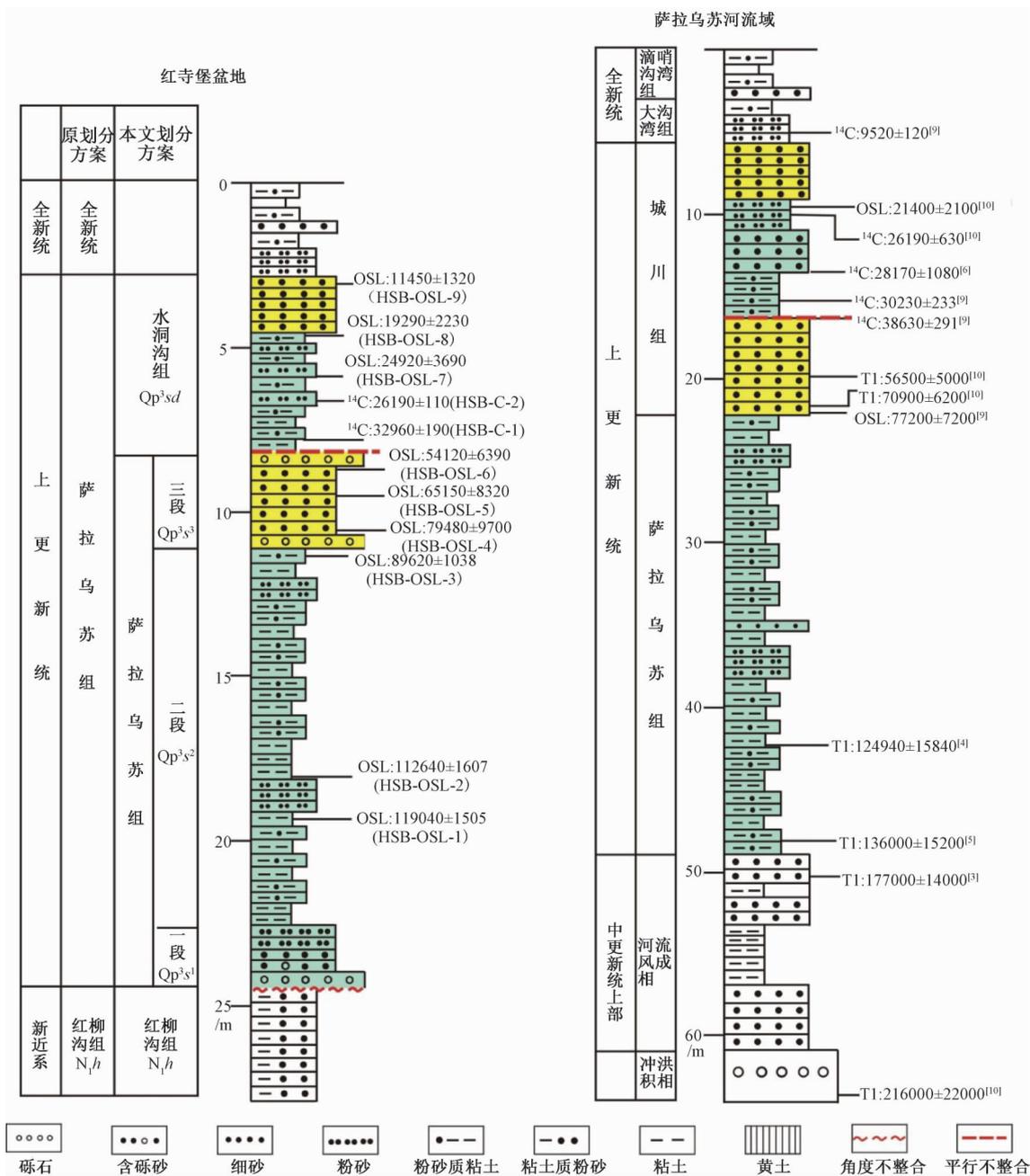


图5 青藏高原东北缘上更新统地层综合对比图

Fig. 5 Comprehensive comparison for the Late Pleistocene strata at the north-eastern margin of the Tibet Plateau

萨拉乌苏组，而上部旋回则相当于萨拉乌苏组河流流域的城川组、宁夏地区广泛分布的水洞沟组。萨拉乌苏组与水洞沟组两套湖相层之间为一套标志性的灰白色湖相砂，砂质疏松，可以作为典型的区域对比标志层。该套湖相砂与下覆湖相粉砂与粘土层之间为整合接触，表现为水体整体变浅、湖水退出红寺堡盆地的特征。因而，将其归属为萨拉乌苏组，命名为萨拉乌苏组三段。萨拉乌苏组一段为一套紫红色厚层粉砂，底部含薄层砾石

层，代表了湖盆充填的初期；萨拉乌苏组二段为一套紫红色薄层粉砂与粘土互层，代表了水体逐渐加深的过程，代表了湖盆充填的高峰期；从萨拉乌苏组一段至萨拉乌苏组三段，沉积序列上表现为明显的湖进至湖退的过程。萨拉乌苏组三段与上覆水洞沟组之间存在明显的沉积间断，二者之间发育一套厚层砾岩。水洞沟组底部为一套含斜层理的含砾粉砂，向上逐渐过渡为灰白色薄层粉砂与粘土互层，表明了水洞沟组本身就构成了

一个湖进序列的开始。根据划分结果, 原来被划分为萨拉乌苏组的地层被分解为下部萨拉乌苏组和上部的水洞沟组, 同时测年结果表明在宁夏红寺堡盆地萨拉乌苏组的地层时代约为 14 ~ 5.4 万年, 水洞沟组地层时代约为 3.2 ~ 1.1 万年 (见图 5)。重新划分的萨拉乌苏组顶部年龄与区域上现今普遍公认的萨拉乌苏组年龄之间还是存在一定的差异, 特别是 7.9 ~ 5.4 万年沉积的这套疏松湖相砂, 在萨拉乌苏河流域将其划分为城川组的底部, 而这里将其划分为萨拉乌苏组的顶部。主要依据: (1) 这套湖相砂在地层序列上与萨拉乌苏组湖相层之间构成了一个完整的沉积旋回, 地层之间为整合接触; (2) 这套湖相砂与上部的水洞

沟组之间存在一明显的沉积间断, 两者之间为区域不整合接触。因此, 根据沉积旋回及地层接触关系将其归属于下部的萨拉乌苏组更为合理。

### 4.2 区域地质意义

新生代以来由于青藏高原的整体隆升, 直接导致了我国西高东低构造地貌格架的基本形成, 从而影响了我国和全球气候环境的变迁以及古人类的生存环境。青藏高原东北缘现今毛乌素沙漠、腾格里沙漠所处的位置在晚更新世发育早、晚两期古大湖。早期古大湖以萨拉乌苏湖为代表, 时限介于 14 ~ 5 万年之间; 晚期古大湖以水洞沟湖为代表, 时限介于 3.2 ~ 1.1 万年之间<sup>[21-22]</sup>。这两期古湖的发育层位与黄土高原区的古土壤 (S<sub>0</sub> 与

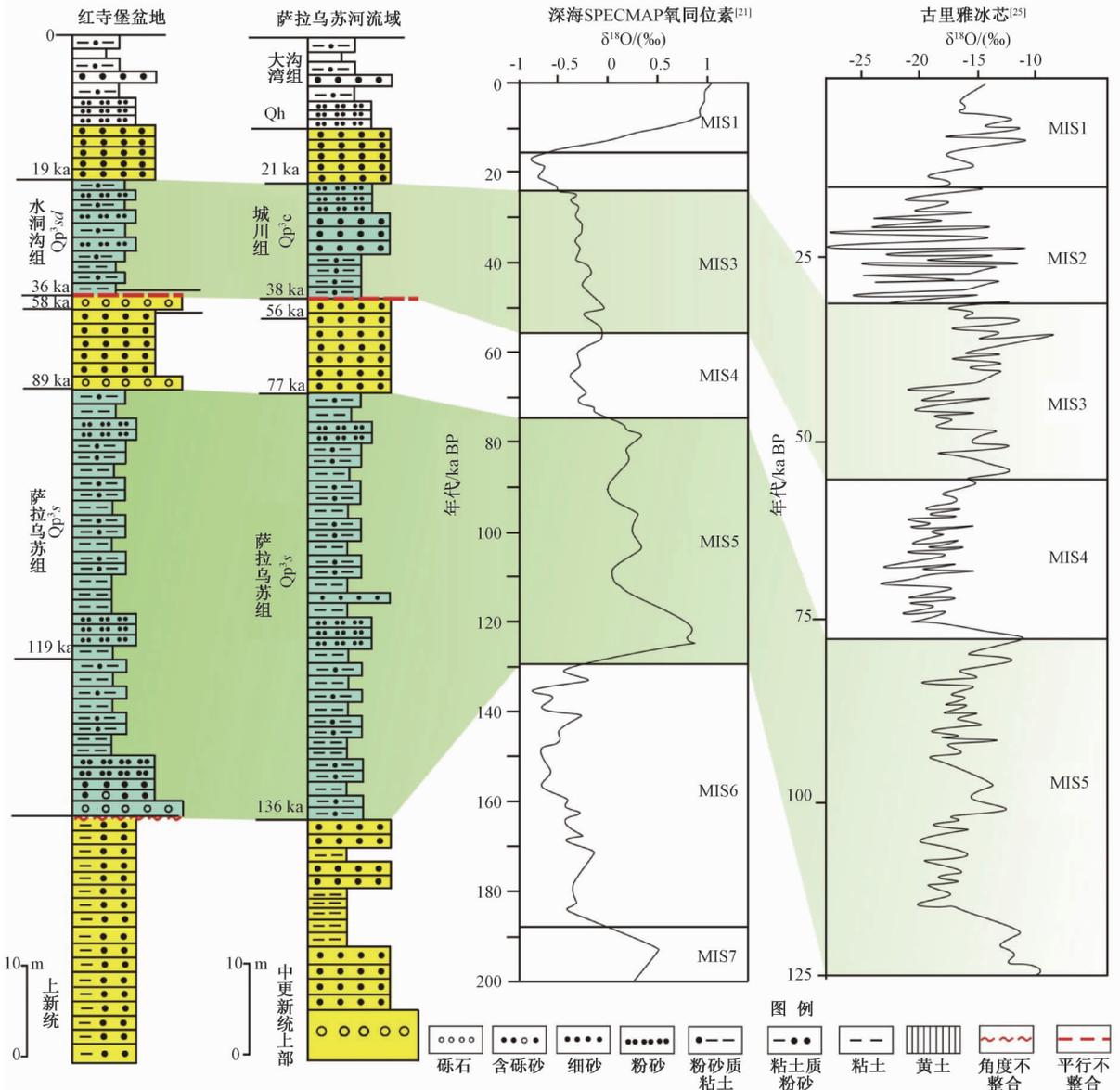


图 6 红寺堡盆地晚更新世沉积序列与深海氧同位素曲线对比图

Fig. 6 Comparison between the Late Pleistocene stratigraphic sequence in the Hongsibu basin and marine oxygen isotope curve

$S_1$ )、华北地区的两期重要海侵层位(白洋淀海侵和沧州海侵)以及深海氧同位素曲线 MIS3(末次冰期间冰阶)与 MIS5(末次冰期间冰期)基本相当,说明在两期古大湖发育时期,中国中东部处于温暖湿润的气候环境,这与全球晚更新世的古气候环境基本一致(见图6)<sup>[23-24]</sup>。古人类的生存空间与古大湖的发展密切相关,晚更新世的两期古湖也分别是古萨拉乌苏人、水洞沟人栖居的主要时代,“沿湖居住、沿河迁徙”是古人类生存、发展的主要方式。

在两期古大湖发育的间断期,大约 7.9~3.2 万年之间,青藏高原东北缘可能存在一期重要的构造-气候事件,在气候上相当于全球末次冰期的早冰阶,气候干冷,在构造上可能响应了一次青藏高原的强烈隆升事件。主要证据如下:(1)青藏高原东北缘萨拉乌苏组三段与上覆水洞沟组之间存在明显的沉积间断,缺失了大约 5.4~3.2 万年沉积地层,两者之间呈现明显的平行不整合

接触,水洞沟组沉积完全叠加在早期萨拉乌苏组沉积之后抬升剥蚀形成的古地貌背景之上,其早期沉积处于填平补齐阶段(见图7);(2)黄土高原阶地研究结果表明,在大约 4~5 万年之间存在一期重要的阶地,该期阶地可能是由于青藏高原的快速隆升造成的<sup>[25-27]</sup>; (3)河套盆地阶地研究结果表明,在大约 4~5 万年之间存在一个重要的 T4 阶地,该时期河流下切深度最大,阴山造山带处于强烈隆升剥蚀期<sup>[25-27]</sup>; (3)在运城盆地,该时期首先存在一套突然死亡的厚蚌层,其时限大约 7.8 万年,在大于 5 万年左右全区存在一期可以完全对比的侵蚀面,在侵蚀面之上就是著名的丁村文化层<sup>[25-30]</sup>。从以上的分析结果可以看出,该期构造事件可能向北影响到了河套盆地,向东影响到了汾渭地堑系的运城盆地,具有区域性的对比意义,响应了晚更新世青藏高原的一期重要隆升事件<sup>[31]</sup>。

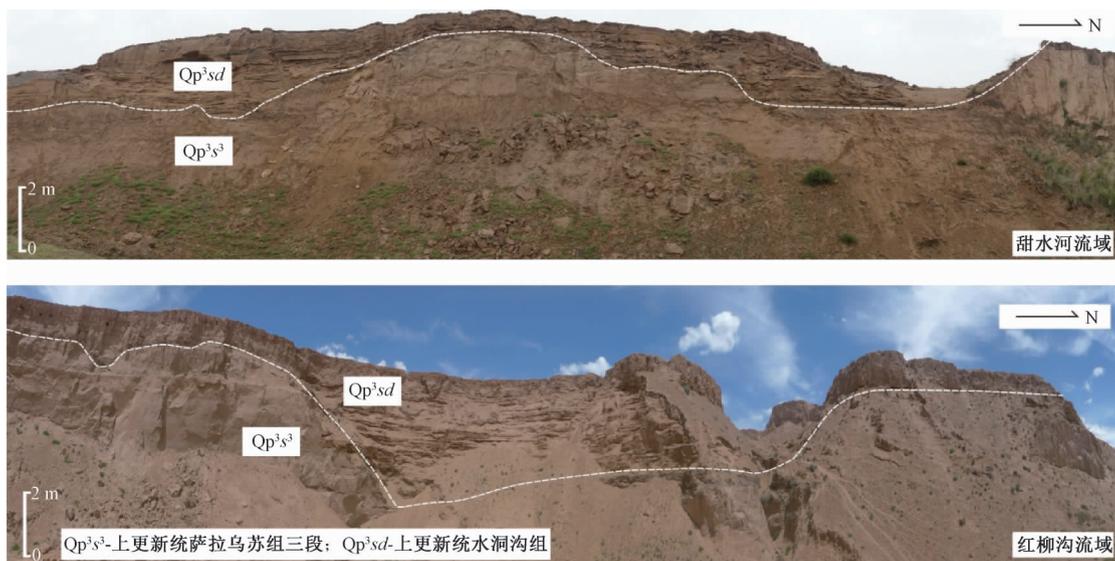


图7 萨拉乌苏组与水洞沟组不整合接触典型照片

Fig. 7 Typical photos showing the unconformity between the Salawusu formation and the Shuidonggou formation

## 5 结论

通过地层对比与沉积旋回划分,重新厘定了红寺堡盆地上更新统综合地层序列。结合光释光和碳十四测年结果,将原定为上更新统萨拉乌苏组的地质划分为萨拉乌苏组和水洞沟组,代表了青藏高原东北缘晚更新世发育的两期重要的古大湖。这两期古大湖在区域上可与深海氧同位素曲

线的 MIS3、MIS5 段相对应,具有全球古环境的对比意义。在两期古大湖发育的间断期,存在一期强烈的构造隆升事件,向北可以影响到河套盆地,向东可以影响到汾渭地堑系的运城盆地,具有区域性对比意义,响应了青藏高原晚更新世的一期重要构造隆升事件。

## 参考文献/References

[1] de Chardin T, Licent F. On the discovery of a palaeolithic

- industry in North China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 1924, 3 (1): 45 ~ 50.
- [2] 李保生, 董光荣, 高尚玉, 等. 鄂尔多斯萨拉乌苏河地区马兰黄土与萨拉乌苏组的关系及其地质时代问题 [J]. *地质学报*, 1987, 61 (3): 218 ~ 230.
- LI Baosheng, DONG Guangrong, GAO Shangyu, et al. Relationship between the Malan Loess and the Salawusu Formation in the Salawusu River area, Ordos and their geological ages [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1987, 61 (3): 218 ~ 230. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郑洪汉. 中国北方晚更新世河湖相地层与风积黄土 [J]. *地球化学*, 1989, 18 (4): 343 ~ 351.
- ZHENG Honghan. Late Pleistocene fluvo-lacustrine deposits and Aeolian loess in North China [J]. *Geochimica*, 1989, 18 (4): 343 ~ 351. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李保生, 董光荣, 吴正, 等. 我国北方上更新统城川组的建立 [J]. *地质论评*, 1993, 39 (2): 91 ~ 100.
- LI Baosheng, DONG Guangrong, WU Zheng, et al. The establishment of the upper Pleistocene Chengchuan formation in Northern China [J]. *Geological Review*, 1993, 39 (2): 91 ~ 100. (in Chinese with English abstract)
- [5] 孙继敏, 丁仲礼, 袁宝印, 等. 再论萨拉乌苏组的地层划分及其沉积环境 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16 (1): 23 ~ 31.
- SUN Jimin, DING Zhongli, YUAN Baoyin, et al. Stratigraphic division of the Sala Us formation and the inferred sedimentary environment [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16 (1): 23 ~ 31. (in Chinese with English abstract)
- [6] 苏志珠, 董光荣, 靳鹤龄. 萨拉乌苏组地层年代学研究 [J]. *地质力学学报*, 1997, 3 (4): 90 ~ 96.
- SU Zhizhu, DONG Guangrong, JIN Heling. A geochronological study of the Salawusu strata in North China [J]. *Journal of Geomechanics*, 1997, 3 (4): 90 ~ 96. (in Chinese with English abstract)
- [7] Li B S, Zhang D D, Jin H L, et al. Paleo-monsoon activities of Mu Us desert, China since 150 ka B. P. —A study of the stratigraphic sequences of the Milangouwan section, Salawusu River area [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 162 (1/2): 1 ~ 16.
- [8] 李保生, 靳鹤龄, 祝一志, 等. 萨拉乌苏河流域第四系岩石地层及其时间界限 [J]. *沉积学报*, 2004, 22 (4): 676 ~ 682.
- LI Baosheng, JIN Heling, ZHU Yizhi, et al. The quaternary Lithostrata in Salawusu river valley and their geochronology [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22 (4): 676 ~ 682. (in Chinese with English abstract)
- [9] 靳鹤龄, 李明启, 苏志珠, 等. 220 ka 以来萨拉乌苏河流域地层磁化率与气候变化 [J]. *中国沙漠*, 2006, 26 (5): 680 ~ 686.
- JIN Heling, LI Mingqi, SU Zhizhu, et al. Climatic change reflected by stratigraphical magnetic susceptibility in Salawusu River Basin, North China since 220 ka BP [J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26 (5): 680 ~ 686. (in Chinese with English abstract)
- [10] 靳鹤龄, 李明启, 苏志珠, 等. 萨拉乌苏河流域地层沉积时代及其反映的气候变化 [J]. *地质学报*, 2007, 81 (3): 307 ~ 315.
- JIN Heling, LI Mingqi, SU Zhizhu, et al. Sedimentary age of strata in the Salawusu River basin and climatic changing [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81 (3): 307 ~ 315. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨劲松, 王永, 闵隆瑞, 等. 萨拉乌苏河流域第四纪地层及古环境研究综述 [J]. *地质论评*, 2012, 58 (6): 1121 ~ 1132.
- YANG Jinsong, WANG Yong, MIN Longrui, et al. Review of quaternary strata and paleoenvironment on Salawusu River valley in North China [J]. *Geological Review*, 2012, 58 (6): 1121 ~ 1132. (in Chinese with English abstract)
- [12] 宁夏回族自治区地质矿产局. 宁夏回族自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1990, 214 ~ 234.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Ningxia Hui Autonomous Region. Regional geology of Ningxia Hui autonomous region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990, 214 ~ 234. (in Chinese)
- [13] 高星, 李进增, MADSEN D B, 等. 水洞沟的新年代测定及相关问题讨论 [J]. *人类学学报*, 2002, 21 (3): 211 ~ 218.
- GAO Xing, LI Jinzeng, MADSEN D B, et al. New <sup>14</sup>C dates for Shuidonggou and related discussions [J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2002, 21 (3): 211 ~ 218. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈虹, 胡健民, 公王斌, 等. 青藏高原东北缘牛首山—罗山断裂带新生代构造变形与演化 [J]. *地学前缘*, 2013, 20 (4): 18 ~ 35.
- CHEN Hong, HU Jianmin, GONG Wangbin, et al. Cenozoic deformation and evolution of the NiuShou Shan-Luo Shan fault zone in the northeast margin of the Tibet Plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20 (4): 18 ~ 35. (in Chinese with English abstract)
- [15] 公王斌, 施炜, 陈虹, 等. 牛首山—罗山断裂带北段柳木高断裂第四纪活动特征 [J]. *地质力学学报*, 2016, 22 (4): 1004 ~ 1014.
- GONG Wangbin, SHI Wei, CHEN Hong, et al. Quaternary active characteristics of the Liumugao fault in the northern segment of the Niushou Shan-Luoshan fault [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22 (4): 1004 ~ 1014. (in Chinese with English abstract)
- [16] 施炜, 刘源, 刘洋, 等. 青藏高原东北缘海原断裂带新生代构造演化 [J]. *地学前缘*, 2013, 20 (4): 1 ~ 17.
- SHI Wei, LIU Yuan, LIU Yang, et al. Cenozoic evolution of the Haiyuan fault zone in the northeast margin of the Tibetan Plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20 (4): 1 ~ 17. (in Chinese with English abstract)
- [17] Chen H, Hu J M, Gong W B, et al. Characteristics and

- transition mechanism of late Cenozoic structural deformation within the Niushoushan-Luoshan fault zone at the northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114: 73 ~ 88.
- [18] Zhang P Z, Burchfiel B C, Molnar P, et al. Amount and style of Late Cenozoic deformation in the Liupan Shan area, Ningxia autonomous region, China [J]. *Tectonics*, 1991, 10 (6): 1111 ~ 1129.
- [19] Zhang P Z, Burchfiel B C, Molnar P, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the Ningxia-Hui autonomous region, China [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1990, 102 (11): 1484 ~ 1498.
- [20] Burchfiel B C, Zhang P Z, Wang Y P, et al. Geology of the Haiyuan fault zone, Ningxia-Hui Autonomous Region, China, and its relation to the evolution of the northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 1991, 10 (6): 1091 ~ 1110.
- [21] Martinson D G, Pisias N G, Hays J D, et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300, 000-year chronostratigraphy [J]. *Quaternary Research*, 1987, 27 (1): 1 ~ 29.
- [22] 郑洪汉, 黄宝林, 乔玉楼, 等. 中国北方晚更新世环境 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1991, 1 ~ 119.  
ZHENG Honghan, HUANG Baolin, QIAO Yulou, et al. The environments of late Pleistocene in northern China [J]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1991, 1 ~ 119. (in Chinese)
- [23] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期气候与环境的基本特征 [A]. 施雅风, 孔昭宸. 中国全新世大暖期气候与环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1992, 1 ~ 18.  
SHI Yafeng, KONG Zhaochen, WANG Sumin, et al. The basic characteristics of climate and environment during Holocene warm season in China [A]. SHI Yafeng, KONG Zhaochen. Beijing: Maritime Press, 1992, 1 ~ 18. (in Chinese)
- [24] 姚檀栋, THOMPSON L G, 施雅风, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 1997, 27 (5): 447 ~ 452.  
YAO Tandong, THOMPSON L G, SHI Yafeng, et al. Climate variation since the Last Interglaciation recorded in the Guliya ice core [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 40 (6): 662 ~ 668.
- [25] Jia L Y, Zhang X J, Ye P S, et al. Development of the alluvial and lacustrine terraces on the northern margin of the Hetao Basin, Inner Mongolia, China; Implications for the evolution of the Yellow River in the Hetao area since the late Pleistocene [J]. *Geomorphology*, 2016, 263: 87 ~ 98.
- [26] Jia L Y, Hu D G, Wu H H, et al. Yellow River terrace sequences of the Gonghe-Guide section in the northeastern Qinghai-Tibet: implications for plateau uplift [J]. *Geomorphology*, 2017, 295: 323 ~ 336.
- [27] 周青硕, 张绪教, 叶培盛, 等. 河套地区全新世黄河古河道的分布及期次划分 [J]. *地质力学学报*, 2017, 23 (3): 339 ~ 347.  
ZHOU Qingshuo, ZHANG Xujiao, YE Peisheng, et al. The distribution and period division of Holocene Palaeo channels of the Yellow River in Hetao area [J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23 (3): 339 ~ 347. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈兴强, 施炜, 胡健民, 等. 华北临汾盆地中部柴庄上新世—更新世剖面沉积学特征及其构造意义 [J]. *地质力学学报*, 2016, 22 (4): 984 ~ 993.  
CHEN Xingqiang, SHI Wei, HU Jianmin, et al. Sedimentation of the Pliocene-Pleistocene Chaizhuang section in the central of Linfen Basin, North China and its tectonic significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22 (4): 984 ~ 993. (in Chinese with English abstract)
- [29] 胡小猛, 杨景春. 临汾盆地末次间冰期以来地貌演化的构造和气候响应 [J]. *地质力学学报*, 2001, 7 (2): 176 ~ 180.  
HU Xiaomeng, YANG Jingchun. The response of the development of Fen River to Neotectonic movement and paleoclimate changes since last Non-Glaciation stage [J]. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7 (2): 176 ~ 180. (in Chinese with English abstract)
- [30] 胡小猛, 杨景春. 临汾盆地中更新世中晚期以来的演化历史及成因分析 [J]. *上海师范大学学报 (自然科学版)*, 2001, 30 (3): 72 ~ 76.  
HU Xiaomeng, YANG Jingchun. The evolution and its contributing factors of Linfen Basin since middle Quaternary [J]. *Journal of Shanghai Teachers University (Natural Sciences)*, 2001, 30 (3): 72 ~ 76. (in Chinese with English abstract)
- [31] 施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化 [J]. *地理学报*, 1999, 54 (1): 10 ~ 20.  
SHI Yafeng, LI Jijun, LI Bingyuan, et al. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and east Asia environmental change during late Cenozoic [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54 (1): 10 ~ 20. (in Chinese with English abstract)