

# 新疆乌恰托云苏约克泉华景观特征及成因

罗培<sup>1,2)</sup>, 文星跃<sup>1)</sup>, 吴勇<sup>1)</sup>, 舒成强<sup>1)</sup>, 罗芳<sup>1)</sup>, 彭昱松<sup>1)</sup>,  
韩曦<sup>1)</sup>, 高林林<sup>1)</sup>, 魏玲<sup>1)</sup>, 张凤秋<sup>1)</sup>, 陈秋艳<sup>1)</sup>

1) 西华师范大学国土资源学院, 四川南充, 637002;

2) 成都理工大学地球科学学院, 成都, 630049

**内容提要:** 苏约克泉华位于新疆乌恰县托云乡托云盆地北缘、天山山系西部吐尔尕特山南麓, 是西北干旱地区泉华的典型代表。在对苏约克泉华水文地质、地貌、区域地质背景进行全面考察的基础上, 通过岩石标本分析、水样全分析, 以及河水和泉水的氢氧稳定同位素比较, 对泉华景观的成因进行了初步研究。结果表明: 苏约克泉为典型的冷泉, 泉水水化学类型为  $\text{HCO}_3\text{—Ca}^{2+}$  型; 吐尔尕特山南坡冰雪融水和夏季降水为其主要补给, 补给高度与雪线高度吻合, 区域内泉水均属于气候成因型; 在地层深部的热变质作用和灰岩去碳酸化过程中产生的大量  $\text{CO}_2$ , 成为逸气的主要气体成分; 在深部水循环过程中部分  $\text{CO}_2$  与围岩、宿主岩石进行化学反应所形成的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等离子, 成为泉华的物质基础; 泉华滩表面密集发育微型钙华池和边石坝。泉华的主要成分为  $\text{CaCO}_3$ , 其次含有少量  $\text{MgCO}_3$ , 类型上属于泉华中的钙华; 氧化形成的高价  $\text{Fe}^{3+}$  使泉华滩呈现出以白色、棕红色为主多种色彩。

**关键词:** 新疆乌恰; 苏约克泉华; 景观特征; 成因

泉华在我国南方岩溶地区较为常见, 最为典型的当属四川黄龙、九寨沟和云南白水台钙华滩, 国外以土耳其的 Pamukkale 最为著名。目前, 关于泉华的研究成果较为丰富, 钟建华等人对塔北硫磺沟的一个古溶洞内古钙华的构造环境和形成机理进行了研究(钟建华等, 2012; 刘再华等, 2009); 万新南等根据戴维斯流域理论及地史演化特征对九寨沟灰化池的成因进行了分析, 根据水均衡原理及 Bogli 岩溶理论对九寨沟的演化进行了探讨, 还对黄龙钙华的源水进行了研究(万新南等, 1994; 万新南等, 2010); 王华等通过碳氧稳定同位素的分析, 对钙华稳定同位素与气候变化的相关性进行了研究(王华等, 2010)。这些研究主要集中于西南湿润地区和青藏高原高寒地区钙华的机理和演化, 本文将从水文地质和岩溶学的角度, 对新疆天山西南干旱区泉华及相关景观的特征、成因进行初步分析。

## 1 研究区概况

苏约克河位于天山西南部典型的山间盆地——

托云盆地, 为新疆乌恰县东北部恰克马克河的第二大支流, 发源于北部中吉边境的吐尔尕特山南坡, 流经托云乡苏约克村和托云村, 汇入恰克玛克河。苏约克河上游有三条近南北走向的次一级支流, 分别为阿依浪苏河、克姆孜苏河与阿拉坎切克河(柯尔克孜族语音译), 苏约克泉华就发育在三条支流上游沟谷谷坡及吐尔尕特山南麓麓冲积扇上(图1), 苏约克泉华在天山地区乃至新疆干旱地区尚属首次发现, 与四川黄龙已经开发成熟的钙华景区相比, 其具有地理位置特殊、分布区域较多、色彩类型多样、成因较为复杂等特点, 具有极高的观赏和科研、科普价值, 为新疆乌恰托云地质公园的核心景观之一。该泉华区毗邻北部中国—吉尔吉斯斯坦边境, 最远处距托云乡 30 余 km, 距离吐尔尕特口岸 20 余 km, 是新疆克州及乌恰县“十二五”规划中重点打造的景区之一。

## 2 景观特征

苏约克泉华景区位于我国典型大陆性气候区,

注: 本文为西华师范大学 2016 年“地质遗迹保护与开发”科研创新团队、四川省教育厅自然科学重点项目“地质公园次生地质环境安全性评价”(编号:14ZA0129), 国家自然科学基金资助项目“岷江上游地区晚第四纪环境变化的古土壤记录与古文化响应”(编号:41671220) 的成果。

收稿日期:2015-12-04; 改回日期:2016-07-27; 责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.01.022

作者简介:罗培, 男, 1974 年生。副教授, 硕士生导师。主要从事地貌学和景观地学研究。Email:luopei1974@163.com。

降水少而集中,地表水尤为稀少,泉流对泉华的意义特别重大,同时该区域泉点分布集中,既有上升泉,也有下降泉,泉点逸气现象明显。本文将与泉华景观相关的地质遗迹都归为泉华景观,主要包括泉、泉华滩、泉华沟等。

### 2.1 泉的水质特征分析

本研究按照《天然矿泉水地质勘探规范》(GB/T13727-92),从2012年8月到2013年8月逐月对阿依浪苏、克姆孜苏和阿拉坎切克7个泉点(群)进行了一个水文年水温动态观测,水温监测数据302组,并于2013年8月对7个泉点(群)采集水样2组,泉群处选择流量较大的泉点取样,于8月22日在新疆第一水文工程地质大队对水样进行了水质全

分析,其结果如表1所示。通过对区域内泉点丰、枯及平水期水温的动态监测和水质分析,大致查明了苏约克泉华景区水文地球化学特征。

#### 2.1.1 物理特性

苏约克泉华景区泉水为无嗅、无味,色度<5度(水中呈现的黄色或黄褐色程度极低),浑浊度<1NTU(水中悬浮物与胶体颗粒含量极低),含极少量的天然矿物盐沉淀,水温在8~13.5℃,其中阿依浪苏1#泉群平均温度稳定在12℃,2#泉群平均温度为11℃,克姆孜苏1#泉稳定温度为12℃,克姆孜苏2#泉稳定温度为13.5℃,克姆孜苏3#泉群稳定温度为8.5℃,阿拉坎切克1#泉群稳定温度为11℃,阿拉坎切克2#泉群稳定温度为9℃,参照我国

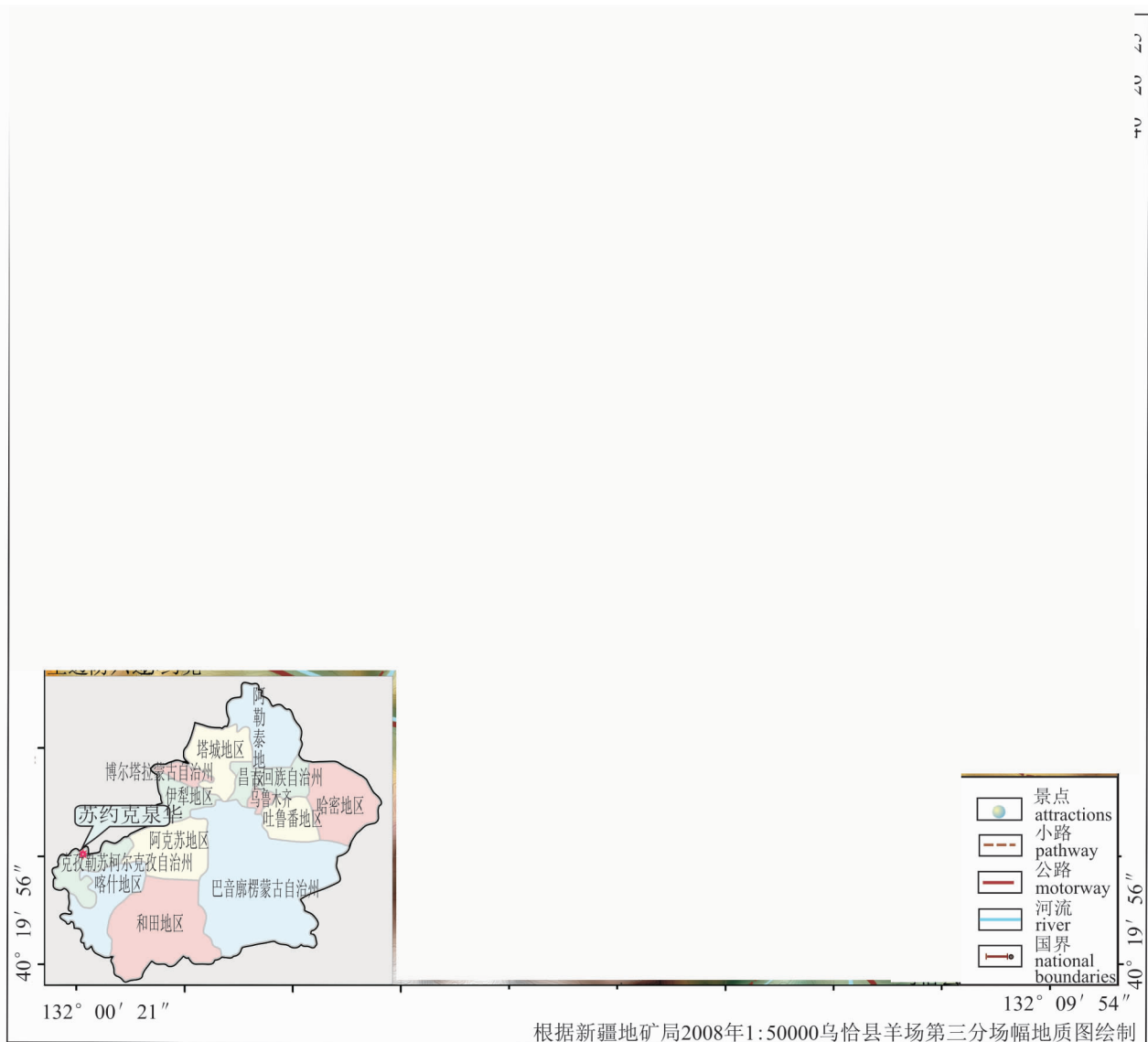


图1 苏约克泉华地理位置及分布图

Fig. 1 The geographic location and distribution of Suyoke thfa

矿泉水温度分类,低于 25℃ 的泉水属于冷泉,根据泉口实测水温 8~13.5℃ 的事实,该泉属于冷泉类。

### 2.1.2 水化学特性

苏约克泉华景区泉水化学特征显示:其  $K^+ + Na^+$  为 17.0~68.8 mg/L,  $Ca^{2+}$  为 212.4~601.2 mg/L,  $Mg^{2+}$  为 36.4~77.8 mg/L,  $Fe^{3+}$  最大可达 0.28 mg/L,  $Fe^{2+}$  均少于 0.05 mg/L,  $HCO_3^-$  为 805.5~2166.2 mg/L,  $SO_4^{2-}$  为 19.2~230.5 mg/L,  $Cl^-$  为 17.7~32.6 mg/L, 游离  $CO_2$  含量为 135.1~1110.3 mg/L, 偏硅酸 12.9~19.2 mg/L, pH 值为 6.61~6.99 mg/L, 总硬度 800.6~1721.4 mg/L, 总碱度 660.5~1776.4 mg/L, 溶解性总固体 885.8~18.2.6 mg/L。由水样全分析结果可以判断,泉水水化学类型为  $HCO_3^- - Ca^{2+}$  型,因此苏约克泉华可定性为钙华。

### 2.2 泉华地貌特征分析

按照《国家地质公园规划编制技术要求》,泉华属于岩溶地貌类景观,按照地质公园建设需要,我们可将泉华景观细分为泉、泉华滩和泉华沟三类。根据实地考察发现,阿依浪苏、克姆孜苏和阿拉坎切克三处泉华区主要的泉点、泉华滩和泉华沟等景观在分布、规模、色彩、景观组合等方面各具特色(表 2、图 2a—2l)。

### 2.3 泉的逸气特征分析

苏约克泉华景区的泉点最典型的特点是:几乎所有的上升泉的泉口都有明显的逸气现象。本次研究采用普通玻璃瓶集气法对阿依浪苏 1# 泉群、克姆孜苏 2# 泉、阿拉坎切克 1# 泉群三处典型泉点泉口分别采取溢出气体分析样品各 1 个(一组),由中国科学院新疆理化技术研究所利用气相色谱仪 TCD 检测器进行了测定,并求其平均含量,结果显示,气体成分主要为  $CO_2$ , 约占泉口溢出气体成分总量的 86.2%, 次为  $N_2$  占 7.2%,  $O_2$  占 6.2%。其组成特征见表 3。

## 3 泉华景观成因及演化条件分析

苏约克泉华属于典型西北干旱地区泉华。泉华是地热流体与深部宿主岩体和通道围岩相互作用的产物,在向地表上行的过程中,因温度、压力等条件发生变化的化学沉积物(胡野圃,1997),因此泉华的形成受地质构造、地层、地貌、补给水源等多个要素的控制。

### 3.1 构造背景

在距今约 280Ma 前的早二叠世( $P_1$ )后期,西伯利亚古板块不断向南漂移产生推挤作用使塔里木地区抬升为陆地,天山褶皱隆起,伴从天山褶皱隆起,一系列重要的近东西走向的走滑或逆冲断裂带将天

表 1 苏约克泉华泉点水样水质一般性指标

Table 1 The water quality general index of springs water sample of Suyueke tufa district

编号 项目	阿依浪苏 1#泉群	阿依浪苏 2#泉群	克姆孜苏 1#泉	克姆孜苏 2#泉	克姆孜苏 3#泉群	阿拉坎切克 1#泉群	阿拉坎切克 2#泉群
$K^+$ (mg/L)	5.1	5.1	1.8	1.6	2.4	4.3	4.7
$Na^+$ (mg/L)	36.1	37.0	17.5	15.4	21.6	24.2	64.1
$Ca^{2+}$ (mg/L)	481.0	481.0	561.1	601.2	212.4	412.8	497.2
$Mg^{2+}$ (mg/L)	72.9	72.9	77.8	36.4	65.6	63.2	70.5
$Fe^{3+}$ (mg/L)	<0.05	0.09	0.28	0.1	<0.05	0.14	0.08
$Fe^{2+}$ (mg/L)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
$NH_4^+$ (mg/L)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
$Cl^-$ (mg/L)	31.9	32.6	20.6	17.7	19.5	17.7	31.9
$SO_4^{2-}$ (mg/L)	240.2	230.5	19.2	48.0	144.1	86.1	76.8
$HCO_3^-$ (mg/L)	1528.6	1507.2	2166.2	2074.7	805.5	1415.7	1818.4
$CO_3^{2-}$ (mg/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$CO_2$ (mg/L)	590.6	398.3	950.1	1110.3	135.1	421.2	588.4
$NO_2^-$ (mg/L)	7.2	12.1	1.6	10.7	1.1	1.5	5.4
$PO_4^{3+}$ (mg/L)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
$H_2SiO_3$ (mg/L)	18.8	19.2	19.4	16.6	16.3	14.9	12.9
pH 值	6.61	6.68	6.75	6.78	6.99	6.90	6.69
总硬度 (mg/L)	1501.2	1501.2	1721.4	1651.3	800.6	1291.0	1531.2
总碱度 (mg/L)	1253.5	1236.0	1776.4	1701.4	660.5	1160.9	1491.2
溶解性总固体 (mg/L)	1658.0	1644.6	1802.6	1785.2	885.8	1333.3	1673.0





阿依浪苏1#泉群[Ayilangsu 1# springs]



阿依浪苏泉华 [Ayilangsu tufa]



克姆孜苏1#泉（群）[Kemuzisu 1# springs]



克姆孜苏2#泉（群）[Kemuzisu 2# springs]



克姆孜苏3#泉（群）[Kemuzisu 3# springs]



克姆孜苏1#泉华 [Kemuzisu 1# tufa]







图 2 苏约克泉华景观

Fig. 2 The Suyueke thfa landform

山分割成不同地块(吕红华等,2013),在现今中吉边境的吐尔尕特山南侧、托云盆地北缘发育的吐尔尕特逆冲断层就是其中之一(新疆地质矿产局第二地质大队,1985;新疆维吾尔自治区区域地层表编组,1981;新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993),苏约克泉华的集中分布区位于吐尔尕特断裂的南缘附近(图3),该断裂为盆地北缘古、中生代的分界线,属于吐尔尕特山前断裂(梁涛等,2005)。断层经吐尔尕特山隘口呈北东—南西向延伸,在阿舒山口附近交与北西南东向的苏约克断裂上,断层向北倾,倾角为 $50^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ,向深部可能变缓,断裂破碎带宽度大于400m。吐尔尕特断裂是发生在天山山系的板块俯冲阶段,因此该断裂带被称为褶皱冲断带(刘和甫,2001),又由于该断裂下切入基底,又被认为属于底卷入型逆冲断层(张宇航等,2013)。正是由于断裂的这些特点,北盘的奥陶系—志留系逆冲于

新近系和第四系上,为钙华的形成奠定构造基础。

从断裂构造形态来看,吐尔尕特断裂为高角度断裂,断层带内地层破碎严重,表现为连续或杂乱,具有良好的储水和运移构造条件;而浅部地层表现为较连续或断续,具有良好的盖层作用。物探解译成果表明,受南西—北东向展布的吐尔尕特压扭性断裂影响,由阿依浪苏河、克姆孜苏河与阿拉坎切克河近南北向切割断裂破碎带,压力骤然降低,泉点沿河两侧断裂破碎带线状出露,而且以上升泉为主。通过野外调查查明,泉点集中分布于阿依浪苏河、克姆孜苏河与阿拉坎切克河出山口长约400m的沟谷两侧25m范围内。因此该构造的形成对苏约克泉水系统的形成,特别是泉水的储存、运移和出露产生重要的控制作用,同时也决定了泉华滩的分布特征。

### 3.2 地层条件

根据1:100000地形地质图(新疆地矿局第二水

表2 苏约克泉华景观类型及地貌特征

Table 2 The landscape types and geomorphic feature of Suyueke tufa

景观类型	景观名称	景观特征
泉	阿依浪苏 1#泉群	该泉群分布于阿依浪苏一段深切沟谷两侧谷坡上,长度40m范围内,有流量大小不等的10多个泉点,多为上升泉,逸气现象明显,泉水流出泉口汩汩作响,泉口周围及泉流路径上均呈深棕红色,形成的泉华面积较小。
	阿依浪苏 2#泉群	是阿依浪苏泉华滩的主要水源,泉点多,水量小,多为下降泉,形成的泉华斑块较多,面积较小,但色彩多样。
	克姆孜苏 1#泉	具承压性,流量稳定,出水口面积约1.5 m <sup>2</sup> 。泉口有典型逸气现象,如水在沸腾,散发出特殊的气味,平均水温12℃(8月)。泉水流入沟谷后,谷底和谷壁都为锈红色或棕红色。
	克姆孜苏 2#泉	具承压性,出水口面积约0.8 m <sup>2</sup> ,流量稳定但小于1号,逸气现象明显。泉点附近的岩石表面呈锈红色。平均水温13.5℃(8月)。
	克姆孜苏 3#泉群	在河流左侧谷坡上长约100 m的范围内,分布数十个下降泉泉点,较大的泉点3处。泉点中水流出后,所经岩壁和河流底部石块上呈现锈红色。
	阿拉坎切克 1#泉群	位于阿拉坎切克泉华上游山麓地带,数十个大小不等的具承压性质的泉点组成,逸气现象明显。泉水流经的地方为灰白色,局部有褐红色。
	阿拉坎切克 2#泉群	位于1#泉群下游100m处,由5个小的下降泉泉点组成,水量较小,在其下游泉水流经坡面上形成白色的泉华滩。
泉华滩	阿依浪苏 泉华滩	分布于沟谷两岸平缓的谷坡上,阿依浪苏 2#泉为其水源,左岸部分面积约40 m <sup>2</sup> ,右岸部分面积20 m <sup>2</sup> ,颜色以白色为主,局部呈棕红色,表面有无数微型的钙华池,层层叠叠。
	克姆孜苏 1#泉华滩	位于克姆孜苏河上游山麓一冲积扇上,面积约7000 m <sup>2</sup> ,但呈不连续性分布,间以大量的砾石和草丛,由于水分的补充不足,局部出现风蚀迹象。
	克姆孜苏 2#泉华滩	由克姆孜苏 2#泉流经山麓堆积体表面而形成,发育良好,面积约4000 m <sup>2</sup> ,以褐红色、黄色为主调,伴有少许白色,表面发育无数层层叠叠微型的钙华池。
	克姆孜苏 3#泉华滩	位于克姆孜苏 2#泉华滩下游,由2#泉流经下游山麓缓坡而成,面积约24000 m <sup>2</sup> ,以红黄色为主调,因势就形,发育良好,表面钙华池发育不典型。
	克姆孜苏 4#泉华滩	位于沟谷左侧谷坡上,面积约120m <sup>2</sup> ,以白色为主,泉华滩平缓地带形成层层叠叠的细小的钙华池;在凌空面上,形成了如石灰岩溶洞中的钟乳石、石旗、石帘等景观。
	克姆孜苏 5#泉华滩	位于4#泉华滩上游50m,山麓缓坡地带的砾石堆积体上,面积约600 m <sup>2</sup> ,颜色以棕红、黄、灰白色为主,表面局部有砾石突出。
	阿拉坎切克 1#泉华滩	位于阿拉坎切克河左岸山麓缓坡堆积体上,阿拉坎切克 1#泉群为泉华水源,面积约12000m <sup>2</sup> ,以白色为主,局部呈棕红色。泉华滩表面发育大小不等,层层叠叠的钙华池,大到10多平方米,小到几个平方厘米。池内发育色白圆润、晶莹剔透、数不胜数的“石珍珠”。
	阿拉坎切克 2#泉华滩	阿拉坎切克 1#泉华滩下游约100 m处,沟谷左侧谷坡上,面积约150m <sup>2</sup> ,以白色、乳白色为主,表面发育微型钙华池,表面形态与下伏地形一致。
泉华沟	克姆孜苏 1#泉华沟	连接克姆孜苏 2#和3#泉华滩的一段长300m的沟谷,沟内水流速度快,谷底呈锈红色,沟内和谷坡上突起的石块上形成大量的小型如针状的石花和石枝,甚是壮观。
	克姆孜苏 2#泉华沟	为克姆孜苏 4#、5#泉华滩所在的沟谷,沟谷长1.5 km,由于受沟谷左侧山麓一系列泉点的影响,这段沟谷的谷底及沟谷内砾石下部为棕红色的物质覆盖,砾石上部形成大量的小型如针状的石花和石枝。

文地质大队三分队,1992,新疆乌恰托云一带地形地质图)和1:50000地质图(新疆地矿局第二区调大队,2008,K43E023014(乌恰县羊场第三分场幅))综合分析,并通过实地考察发现,苏约克泉华区地层为志留系(S)沉积岩系碳酸盐岩中的灰白色灰岩,以及变质岩系硅酸盐岩类型中的大理岩化硅质灰岩,分析认为其形成大洋背景下的大陆裂谷有关(Woolley,1989;宋文磊等,2012),地层产状 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \angle 40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ,吐尔尕特逆冲断层主要切割这个地层,并形成破碎带,该岩层是泉流深部循环的宿主岩石和围岩,是泉华的物质来源。

### 3.3 地貌条件

苏约克三处泉华小区位于吐尔尕特山麓阿依浪苏河、克姆孜苏河与阿拉坎切克河出山口处,地面高程3390~3612m,相对高程220m左右,地形总体上均呈现出“两山夹一(河)谷”形态,有利于泉点集中于沟谷分布,利于泉华滩的形成。同时吐尔尕特山南坡的积雪带较吐尔尕特断裂破碎带海拔高,有利于冰雪融水的汇集、储存,并运移和补给到断裂破碎带。阿依浪苏河、克姆孜苏河与阿拉坎切克河均位于吐尔尕特山南侧,光照时间长,也有利于冰雪融水的形成。在泉点集中的沟谷出山口附近,多形成



图 3 苏约克泉华区地质图  
Fig. 3 Geologic map of Suyueke tufa district

冲积扇,地势低缓、面积大,泉流流经冲积扇多形成面状水流,有利于泉华滩的形成与展布。

### 3.4 水文地质条件

通过实地考察和同类地区(李忠勤等,2010)比较可以推断,苏约克泉华区泉水补给来源主要为其北部海拔 4000 m 以上吐尔尕特高山冰雪融水侧向径流补给及河水垂向入渗补给,补给量充足。泉华区每年 3 月底开始解冻,首先冰雪融水直接缓慢入

渗到基岩裂隙、灰岩裂隙溶洞中,对地下水进行部分补给,到 5 月初达到第一个补给高峰。据该区域水文资料表明,每年 5 ~ 8 月的集中降水,约占全年降水量的 60% 以上,同时吐尔尕特山上部的积雪也开始消融,这段时间是泉华区接受地下水补给的最佳时段。基岩裂隙水自北向南径流,多沿裂隙、断裂破碎带短途径流,泉流排泄主要以沿沟谷的上升泉方式进入沟谷。

## 4 泉华景观的形成过程

### 4.1 泉的形成

#### (1) 泉点的补给水源分析

采用氢、氧稳定同位素在水循环中的示踪实验判别泉水的充水来源,已成为有效方法(焦艳军等, 2014;孙海龙等, 2008),由于考察条件限制,在分析苏约克泉华区泉水源水时,采用了对河水和泉水的氢氧稳定同位素进行比较的研究方法。研究分别采集了1个阿依浪苏河水样品和3个泉水样品,其 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 、 $^3\text{H}$ 和温度见表4。由于大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 值和温度呈线性负相关关系,温度越高, $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值就越低,采取同位素样的阿依浪苏1#泉群、克姆孜苏2#泉、阿拉坎切克1#泉实测水温度分别为12℃、13.5℃和11℃,河水常年温度6℃,河水的 $\delta\text{D}(\text{SMOW})$ 值为-44.3‰,  $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 值为-6.86‰,通过和其他三处泉点的氢、氧稳定同位素的值进行初步比对和分析发现,其他三处泉水的稳定同位素的变化符合大气降水的 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值和温度的线性负相关关系,由此初步推测研究区泉水及河水应属大气降水补给来源。

泉点的补给水源分析还可以通过大气降水方程比较来进一步验证。以阿依浪苏1#泉为例,根据阿依浪苏上游河水和阿依浪苏1#泉 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 可以求出其大气降水线方程为:

$$\delta\text{D}(\text{SMOW}) = 7.13\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW}) + 4.61\text{‰}$$

对比全球大气降水线方程:

$$\delta\text{D}(\text{SMOW}) = 8\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW}) + 10\text{‰}$$

两条大气降水线基本相符,其他三处泉点的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 均位于全球大气降水线附近。由此进一步说明区域内泉点和河水均由大气降水补给(图4)。

根据放射性同位素衰变原理, $^3\text{H}$ 值越低说明泉水的封闭条件好,在地下循环时间长,地下水的补

给、径流条件相对较差,地下水循环相对较弱,泉水受地表蒸发作用影响程度微弱,主要为远期降水补给形成,从而可以间接说明泉水来自地下深处循环所成。通过对以上 $^3\text{H}$ 值对比发现,三处典型泉水中 $^3\text{H}$ 值低于当地地表水 $^3\text{H}$ 值。河流的 $^3\text{H}$ 值含量相对较高,是由于河水属地表水,高山区冰雪融水等冷水混入使 $^3\text{H}$ 值增加,证明河水的停留时间较短,这意味着阿依浪苏河水有较充足的补给量、良好的渗透性和径流、排泄条件,因而能在较短的时间里完成从补到排的径流过程,赋予地表水系统较丰富的水资源。但三处泉点 $^3\text{H}$ 较低,可以推断,大气降水在封闭条件较好的情况下,经过长时间的地下深部循环,才出露成泉点。

#### (2) 泉点的补给高度分析

利用大气降水同位素高程效应可以初步确定矿泉水补给区和补给高程。全球干旱半干旱地区的大气降水 $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 高程梯度均值为-0.13‰/100m(以平原区为主),该高程梯度值不符合工作区内高山地貌区 $\delta^{18}\text{O}$ 高程梯度值实际情况,因此采用与工作区地貌位置类似的西藏东部地区的 $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW})$ 高程梯度均值-0.26‰/100m作为工作区的高程梯度值,利用下式计算:

$$H_{\text{补}} = \frac{\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW}, \text{泉}) - \delta^{18}\text{O}(\text{SMOW}, \text{河})}{K + H_{\text{泉}}}$$

其中: $H_{\text{补}}$ —矿泉水出露处补给高程(m); $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW}, \text{泉})$ —矿泉水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW}, \text{河})$ —河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; $K$ — $\delta^{18}\text{O}$ 高程梯度均值系数(-0.26‰/100m); $H_{\text{泉}}$ —矿泉点出露位置高程。

根据表4的数值,初步计算后,阿依浪苏1#泉、克姆孜苏2#泉和阿拉坎切克1#泉出露处的补给高程分别在4375 m、4335 m和4261 m左右,与工作区

表3 苏约克泉华区泉水的气体组成

Table 3 The gas composition of springs in Suyueke tufa district

项目	H <sub>2</sub> S (%)	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	CO (mg/mL)	N <sub>2</sub> (%)	NH <sub>3</sub> (ug/mL)	CH <sub>4</sub> (%)	Rn 射气
平均含量	未检出	6.2	86.2	0.125	7.2	<0.025	<0.01	18.2 bq/L

表4 泉点及河水的氢氧稳定同位素比较

Table 4 The Comparison of hydrogen and oxygen stable isotope between courant water and springs water

序号	取样位置	样品类型	高程(m)	实测水温(℃)	$\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW}, \text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{SMOW}, \text{‰})$	$^3\text{H}(\text{TU})$	取样日期
1	阿依浪苏河上游	地表水		6.0	-6.86	-44.3	5.06	2013-08-03
2	阿依浪苏1#泉群	冷泉水	3425	12.0	-9.33	-61.9	<2	2013-08-03
3	克姆孜苏2#泉	冷泉水	3484	13.5	-9.87	-59.4	<2	2013-08-03
4	阿拉坎切克1#泉	冷泉水	3508	11.0	-8.12	-56.3	<2	2013-08-03



北部的吐尔尕特山南坡区平均雪线高程 4240 ~ 4400m 相对应,补给高程位置吻合程度较好,并与已有的研究成果相符(乃尉华等,2011)。因此可以推测苏约克泉华区泉水的补给区位于工作区北部的吐尔尕特山南坡区雪线附近的区域。

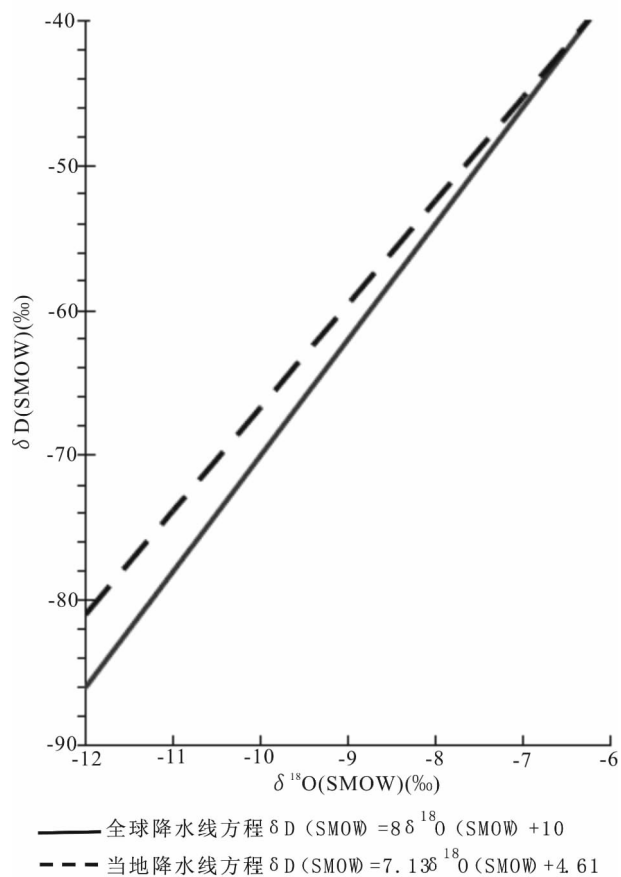


图 4 阿依浪苏 1# 泉  $\delta^{18}\text{O}$  与  $\delta\text{D}$  关系图

Fig. 4 The relation curve of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  in Ayilangsu 1# spring

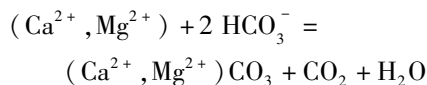
## 4.2 泉的形成过程

泉的形成阶段主要包括泉流的形成和泉流中主要化学物质的形成。补给水源不断进入断裂破碎带,出循环阶段后,再出露地表形成了泉。参考有关地质资料(单敬福等,2015;张立飞等,2005;蒲晓菲等,2010),根据破碎带岩石样品、泉口气体样品初步推断,泉水流经的破碎带深部原生环境以变质作用为主,含大量的  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$  等成分的灰岩或者大理岩化硅质灰岩,在高温、高压环境和水溶液的持续循环过程中,各离子成分活动性增强,发生去碳酸化,产生大量  $\text{CO}_2$ ,由于深度的加大, $\text{CO}_2$  溶解量增

加,部分  $\text{CO}_2$  又与天青石、菱锶矿等围岩中碳酸盐岩、硅酸盐岩等发生反应形成新的矿物,出露地表后,基岩裂隙水形成了富含  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等金属离子和  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等非金属离子的泉水。同时由于  $\text{CO}_2$  分压的降低,大量的游离  $\text{CO}_2$  和少量  $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$  迅速逸出泉口,这就是逸气现象的原因。关于泉水中  $\text{CO}_2$  气体的来源,目前有气候成因论(周绪纶,2006)和热成因论,根据以上分析,初步判断此区域泉水  $\text{CO}_2$  气体应符合热成因论观点。根据以上氢氧同位素判断,作者认为苏约克泉水属于气候成因型。

## 4.3 泉华的形成

富含  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等阳离子和  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等阴离子的泉水,同时含有少量的  $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  等离子,泉流流出泉口后,泉口附近环境压强降低, $\text{CO}_2$  分压减小,产生  $\text{CO}_2$ “逸气现象”,大量的钙离子、镁离子在泉口下游缓坡、冲积扇上析出、沉淀,逐渐形成扇状钙华滩(图 2),反应方程式为:



同时由于水动力效应,流出泉口的泉水形成高速水流,产生大量气泡,有专家称之为“气泡效应”(张英骏等,1982)。泉口外泉水顺坡面流动时水体变薄,产生“薄水效应”(程星,1994),同时泉口外温度的升高,均有利于  $\text{CO}_2$  的逸出,从而导致  $(\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+})\text{CO}_3$  沉淀。经采样分析,钙华主要成分为  $\text{CaCO}_3$ ,其次含有少量  $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 。

由于深层裂隙水中还含有部分低价铁离子,地表的温度变化导致低价铁离子氧化为高价铁离子,并在泉口、泉华的局部、泉水流经的沟谷形成棕红色、铁锈色的沉积层,因此各个泉华滩色彩及其组合迥异,克姆孜苏 2#、3#泉华滩主要以棕红色、棕黄色为主,克姆孜苏 4#泉华滩、阿拉坎切克 1#、2#泉华滩以白色为主,其他泉华滩白色、棕红色、棕黄色等多色混杂。

## 5 初步结论

本研究是基于地质公园申报和旅游开发的目的地而展开,通过多次实地调查,并在岩石样本和水样分析基础上,对苏约克泉华进行了特征阐述和成因的初步探讨,主要结论如下。

(1) 苏约克泉华景区泉水为典型的气候成因型冷泉景观,补给高度与吐尔尕特南坡雪线高度相对

应, 泉口水温在大致在 8 ~ 13.5℃, 无嗅、无味, 水质良好, 含极少量的天然矿物盐沉淀。受水源地围岩和宿主岩石的影响, 苏约克泉华区的泉流化学成分以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等为主, 同时  $\text{CO}_2$  气体是逸气现象中的主要气体成分, 初步判断为热成因型。

2) 泉华滩主要分布在阿依浪苏河、克姆孜苏河与阿拉坎切克河上游吐尔尕特山出山口的沟谷两侧低缓谷坡或者冲积扇上, 面积 20 ~ 7000  $\text{m}^2$  不等, 展布因势就形, 以白色、棕红色、黄白色为主色调, 滩面上密集发育面积大小各异的钙华池和边石坝, 特色突出, 极具观赏、科普和科研价值。北部吐尔尕特山南坡的冰雪融水和夏季的集中降水, 为钙华滩形成提供充足的“源水”补给(万新南, 2010), 吐尔尕特山前断裂带形成的破碎带为泉水补给提供了良好的储存、运移和排泄条件, 泉流中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等离子成为泉华滩景观形成的直接物质来源。低价  $\text{Fe}^{2+}$  不断被氧化为  $\text{Fe}^{3+}$  并沉淀使泉口附近及下游沟谷形成棕红色。

苏约克泉华是的大陆性干旱气候区泉华景观的典型代表, 目前该类泉华研究成果有限。要进一步认识该类泉华的特征和成因, 还需深入考察和实验, 如用碳同位素的测试和分析更准确判断  $\text{CO}_2$  来源, 钙华沉积的定量分析, 水化学特性的深入分析, 泉华的类型划分等。

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 程星. 1994. 薄水效应初论. 中国岩溶, 13:207 ~ 212.
- 胡野圃. 1997. 泉华的家庭成员. 地球, (1):14 ~ 18.
- 焦艳军, 王广才, 范有余, 孙婷婷, 赵晓丽, 史浙明, 马桀, 卢忠阳, 崔霖峰, 吕琳. 2014. 基于氢氧同位素和水化学的废弃煤矿充水水源识别. 第四纪研究, 34(5):1054 ~ 1061.
- 李忠勤, 李开明, 王林. 2010. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究. 第四纪研究, 30(1):96 ~ 107.
- 梁涛, 罗照华, 李文韬, 柯珊, 李莉, 詹华明. 2005. 托云火山群的火山地质特征及其构造意义. 新疆地质, 23(2):105 ~ 111.
- 刘再华, 田友萍, 安德军, 王海静, 唐淑, 张金流, 孙海龙, 刘彦, 张清明. 2009. 世界自然遗产——四川黄龙钙华景观的形成与演化. 地球学报, 30(6):841 ~ 847.
- 刘和甫. 2001. 盆地—山岭耦合体系与地球动力学机制. 地球科学, 26(6):581 ~ 595.
- 吕红华, 李玮, 常远, 周祖翼. 2013. 新疆天山造山带新生代多期次剥露作用过程. 第四纪研究, 33(4):812 ~ 822.
- 乃尉华, 张磊, 张振民. 2011. 新疆乌恰县阿依浪苏碳酸型矿泉水成因初探. 西部探矿工程, (9):154 ~ 156.
- 蒲晓菲, 宋述光, 张立飞, 魏春景. 2010. 西南天山超高压变质带中

- 志留纪岛弧火山岩岩片及其构造意义. 岩石学报, 27(6):1675 ~ 1687.
- 宋文磊, 许成, 刘琼, 王林均, 吴敏, 曾亮. 2012. 火成碳酸岩的实验岩石学研究及对地球深部碳循环的意义. 地质论评, 58(4):726 ~ 744.
- 单敬福, 赵忠军, 李浮萍, 程都, 王博. 2015. 砂质碎屑储层钙质夹层形成机理及其主控因素分析. 地质论评, 16(3):614 ~ 620.
- 孙海龙, 刘再华, 吕保樱, 叶文炳, 刘香玲, 曾成, 王海静. 2008. 云南白水台雨水线及钙华  $\delta^{18}\text{O}$  的季节和空间变化特征. 地球化学, 37(6):542 ~ 548.
- 万新南, 杨菊, 程温莹, 罗丽, 安德军, 唐淑, 台永东. 2010. 四川黄龙景区“源水”成因浅析. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(1):91 ~ 95.
- 万新南, 陈叙伦, 许模. 1994. 九寨沟沟谷成因与演化. 山地研究, 12(3):148 ~ 154.
- 王华, 覃嘉铭, 安德军, 杨琰, 孙海龙, 林玉山, 杨勋林, 应启和, 张清明. 2010. 黄龙钙华 $^{210}\text{Pb}$  计年与现代沉积的环境变化研究. 地球学报, 31(2):216 ~ 222. 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京:地质出版社.
- 新疆地质矿产局第二地质大队. 1985. 新疆南疆西部地质图、矿产图说明书. 北京:中国地质大学出版社, 49 ~ 57.
- 新疆维吾尔自治区区域地层表编写组. 1981. 西北地区区域地层表, 新疆维吾尔自治区分册. 北京:地质出版社, 252 ~ 255.
- 张宇航, 汤良杰, 邱海峻, 云露, 杨勇, 谢大庆, 蒋华山. 2013. 塔里木盆地巴楚隆起西段边界断层联接及变形特征. 地球科学, 38(3):573 ~ 580.
- 张立飞, 艾永亮, 李强, 李旭平, 宋述光, 魏春景. 2005. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化. 岩石学报, 21(4):1029 ~ 1038.
- 张英骏, 莫仲达. 1982. 黄果树瀑布成因初探. 地理学报, 37(3):303 ~ 316.
- 钟建华, 毛毳, 李勇, 李阳, 袁向春, 牛永斌, 陈鑫, 黄知娟, 邵珠福, 王培俊, 李佳, 张丹峰. 2012. 塔北硫磺沟奥陶系含油古潜洞的发现及意义. 中国科学:地球科学, 42(11):1660 ~ 1680.
- 周绪纶. 2006. 关于四川黄龙钙华  $\text{CO}_2$  成因的讨论. 四川地质学报, 26(3):143 ~ 146.
- Cheng Xing. 1994&. Discussion on thin-water effect. *Crsologica Sinica*, 13:207 ~ 212.
- Hu Yepu. 1997&. The Family Members of Travertine Tufa. *The Earth*, (1):14 ~ 18.
- Jiao Yanjun, Wang Guangcai, Fan Youyu, Sun Tingting, Zhao Xiaoli, Shi Zheming, Ma Luan, Lu Zhongyang, Cui Linfeng, Lv Lin. 2014&. distinguishing water sources of the abandoned mine in FengFeng mineing area by using hideochemistry and hydrogen, oxgen isotopes. *Quaternary Sciences*, 34(5):1054 ~ 1061
- Li Zhongqing, Li Kaiming, Wang Lin. 2010&. Recent changes in glaciers in Xinjiang and impacts on water resources. *Quaternary Sciences*, 30(1):96 ~ 107.
- Liang Tao, Luo Zaohua, Li Wentao, Ke Shan, Li Li, Zhan Huaming. 2004&. Geologic Features and Tectonic Implications of the Tuyon Volcano Group. *Xinjiang Geology*, 33(3):269 ~ 278.
- Liu Zaihua., Tian Youping., An Dejun, Tan Shu, Zhang Jinlong, Sun Hailong, Liu Yan, Zhang Qingming. 2009&. Formation and evolution of the travertine landscape at Huanglong, Sichuan, One of the world natural heritages. *Acta Geoscientia Sinica*, 30(6):841 ~ 847.
- Liu Hefu. 2001&. Geodynamic Scenario of Coupled Basin and Mountain System. *Earth Science—Journal of China University of*

- Geosciences, 26(6):581~595.
- Lv Honghua, Wang Wei, Chang Yuan, Zhou Zuyi. 2013&. Cenozoic episodic exhumation of the Tianshan range NW China. *Quaternary Sciences*, 33(4):812~822.
- Nai Weihua, Zhang Lei, Zhang Zhenming. 2011&. The causes of carbonated mineral water in Ayilangsu of Xinjiang Wuqia. *West Prospecting Engineering*, (9):154~156.
- Pu Xiaofei, Song Shuuang, Zhang Lifei, Wei Chunjing. 2010&. Silurian Arc Volcanic Slices and Their Tectonic Implications in the Southwestern Tianshan UHPM Belt, NW China *Acta Petrologica Sinica*, 27(6):1675~1687.
- Zeng Liang, Shan Jingfu, Zhao Zhongjun, Li Fuping, Cheng Du, Wang Bo. 2015&. Mechanism and Controlling Factors of Calcium Interbeds Formed in the Reservoir. *GEOLOGICAL RIVIEW*, 16(3):614~620.
- Song Wenlei, Xu Cheng, Liu Qiong, Wang Linjun, Wu Min. 2012&. Experimental Petrological Study of Carbonatite and Its Significances on the Earth Deep Carbon Cycle. *Geochimica*, 58(4):726~744.
- Sun Hailong, Liu Zaihua, Lv Baoying, Ye Wenbing, Liu Xiangling, Zeng Chen, Wang Haijing. 2008&. Meteoric water line and spatioteporal change in  $\delta^{18}O$  of the travertine in Baishuitai area. *Geochimica*, 37(6):542~548.
- Wan Xinnan, Yang Ju, Chen Wenyong, Luo Li, An Dejun, Tang Shu, Tai Yongdong. 2010&. Headwater Origin Analysis in the Huanglong Scenic Spot, Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 37(1):91~95.
- Wan Xinnan, Chen Xulun, Xu Mo. 1994&. The Evolution and Origin of Jiuzhai Valley. *Mountain Research*, 12(3):148~154.
- Wang Hua, Qin Jiaming, An Dejun, Yang Yan, Sun Hailong, Lin Yushan, Yang Xunlin, Ying Qihe, Zhang Qingming. 2010&. A Study of  $^{210}Pb$  Dating and Climatic Changes of Modern Sediments from Tufa in Huanglong, Sichuan Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(2):216~222.
- Woolley A R. 1989. The spatial and temporal distribution of carbonatites. In: Bell K. ed. *Carbonatites: Genesis and Evolution*. London, U. K. ; Unwin Hyman, 15~37.
- Geology and Mineral Resources Bureau of Xinjinag Uygur Autonomous Region. 1993&. *Regional Geology of Uygur autonomous region*. Beijing: Geological publishing house.
- The Second Geological Brigade of Geology and Mineral Resources Bureau of Uygur Autonomous Region. 1985#. *Geological and Mineral Maps Instructions of the West of Southern Xinjiang*. Beijing: China University of Geosciences Press, 49~57.
- The writing group of regional stratigraphic table of Uygur autonomous region. *Regional Stratigraphic Table of Northwest*. 1981#. The Volume of Uygur Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House, 25~255.
- Zhang Yuhang, Tang Liangjie, Qiu Haijun, Yun Lu, Yang Yong, Xie Daqing, Jiang Huashan. 2013&. Geodynamic Scenario of Coupled Basin and Mountain System. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(3):573~580.
- Zhang Lifei, Ai Yongliang, Li Qiang, Li Xuping, Song Shuguang, Wei Chunjing. 2005&. The Formation and Tectonic Evolution of UHP Metamorphic Belt in Southwestern Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4):1029~1038.
- Zhang Yingjun, Mo Zhongda. 1982&. The origin and evolution of orange fall. *Acta Gographica Sinica*, 37(3):303~316.
- Zhong Jianhua, Mao Cui, Li Yong, Yuan Xiangchun, Niu Yongbin, Chen Xin, Huang Zhijuan, Shao Zhufu, Wang Peijun, Li Jia, Zhang Danfeng. 2012&. Discovery of the Ancient Ordovician oil-bearing Karst Cave in Liuhuanggou, North Tarim Basin, and its Significance. *Science China: Earth Sciences*, 42(11):1660~1680, doi: 10.1007/s11430-012-4467-3.
- Zhou Xulun. 2006&. A Discussion on Genesis of  $CO_2$  in the Huanglong Travertine, Sichuan. *Acta Geologica Sichuan*, 26(3):143~146.

## The Landscape Features and Genesis of Suyueke Tufa in Wuqia, Xinjiang

LUO Pei<sup>1,2)</sup>, WEN Xingyao<sup>1)</sup>, WU Yong<sup>1)</sup>, SHU Chenqiang<sup>1)</sup>, LUO Fang<sup>1)</sup>, PENG Yusong<sup>1)</sup>,  
HAN Xi<sup>1)</sup>, GAO Linlin<sup>1)</sup>, WEI Ling<sup>1)</sup>, ZHANG Fengqiu<sup>1)</sup>, CHEN Qiuyan<sup>1)</sup>

1) *Land and Resources College, China West Normal University, Nanchong, Sichuan, 637002*

2) *College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059*

**Abstract:** Based on the comprehensive survey on hydrogeological characteristics, geomorphology, and geology background of Suyueke tufa in Wuqia, Xinjiang, through the analysis of rock samples, total analysis of water samples and the comparison of hydrogen and oxygen stable isotope between river and springs water, the paper conducted a preliminary study of the causes of tufa landscape. The results indicated, the springs in Suyueke are typical cool springs, the hydrochemistry type of the springs is  $HCO_3^-Ca$ , the snow meltwater and summer rainfall on the southern slope of the mountain Turgart are main water sources of these springs, the recharging altitude corresponds with the snow line; The spring are all climate causes type; During the process of thermal metamorphism of deep strata and removing carbonation of Limestone, a great deal of carbon dioxide generated, which is the main gas composition in outgassing phenomenon of spring exports; In deep water cycle, the huge number of  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  and other small amount of ion are produced by the chemical reaction between  $CO_2$  and adjacent rock

or host rock, which are the material basis of tufa; Tufa shoal are mainly located on the slope of the valley and alluvial fans with variety of colors, such as white, brown and other colors, layers of travertine pools and rimstone dam developed on the surface of the tufa shoal. The main component of tufa are  $\text{CaCO}_3$  and a slight amount of  $\text{MgCO}_3$ , Suyueke tufa is essentially the calcareous sinter. It is the ferric iron from oxidizing action or other elements that made the tufa shoal showing a variety of colors, such as brown, yellow, brownish red, and offwhite. Suyueke tufa has a strong aesthetic value and scientific value.

**Keywords:** Xinjiang, Wuqia; Suyueke tufa; the landscape features; genesis

**Acknowledgements:** This research is supported by China West Normal University Research innovation team “Protection and Development of Geological heritage” in 2016, the Natural Science Key Project “Safety Evaluation of Secondary Geological Environment in Geoparks” (No. 14ZA0129) of Department of Education of Sichuan Province; and National Natural Science Foundation project of China “Paleosol record and ancient culture response of Late Quaternary environmental change in the upper reaches of Minjiang River” (No. 41671220).

**First author:** First author: LUO Pei, male, born in 1974. Professor, master supervisor. Mainly engaged in the study of Geomorphology and Landscape geology.

Manuscript received on: 2015-12-04; Accepted on: 2016-07-27; Edited by: ZHANG Yuxu.

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2017.01.022