

张红敏,赵学钦,王富东,等.四川九寨沟诺日朗瀑布钙华大坝放射性及沉积环境意义[J].中国岩溶,2021,40(1):157-165.
DOI:10.11932/karst20210117

四川九寨沟诺日朗瀑布钙华大坝放射性 及沉积环境意义

张红敏^{1,2},赵学钦^{1,2},王富东^{1,2},吴昌达^{1,2},李松^{1,2}

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学国土资源利用研究所, 四川 绵阳 621010)

摘要:以九寨沟诺日朗瀑布钙华大坝为研究对象,采用便携式手持伽马仪对大坝坝体进行放射性强度测量,同时对钙华大坝取样,进行主量、微量元素分析,以研究大坝形成的沉积环境。结果表明:大坝表层伽马辐射量平均值为27.57 Ur(当量铀),变异系数为18.73%;钙华主微量元素分析显示钙华颜色与本身所含的色素元素和矿物有关;大坝钙华(La/Yb)N介于8.57~14.93,均值为11.78,具有轻稀土元素富集特征。综合分析认为诺日朗瀑布大坝钙华颜色的形成是多因素共同作用的结果,钙华放射性元素含量与钙华颜色以及伽马值之间存在正相关性,伽马值在钙华沉积环境方面具有指示作用,伽马值越高代表其形成环境相对更湿润。

关键词:九寨沟;诺日朗瀑布;自然伽马;微量元素;沉积环境

中图分类号:P532;P642.25

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2021)01-0157-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

钙华又称石灰华(travertine或tufa),是一种典型的陆相碳酸盐沉积物,其研究和应用由来已久,远在2000多年前,东西方国家就已有对钙华的发现和认识^[1-2]。20世纪以来,随着科学技术的不断进步以及多学科交叉发展的促进,对钙华的深入研究使其在古环境、古气候信息^[3-7]方面得以广泛应用,并日益凸显其独特性和不可替代性。中国青藏高原的钙华分布广泛,这无论是对研究水文、气候条件,还是对分析新构造活动都具有特殊意义,其也是开展地球关键带^[8-10]研究的绝佳场所。例如,刘再华等^[11-12]检测云南白水台沉积钙华碳氧同位素并研究发现碳氧同位素的变化能够指示区域环境植被的变化;王华等^[6,13]通过分析钙华氧碳同位素对黄龙张家沟钙华剖面进行了系统研究,重建了钙华沉积过程中的环

境变化;覃建勋等^[14]对钙华进行碳氧同位素、微量元素、稀土元素测量和研究发现,钙华深色层一般形成于夏秋季节,而浅色层则通常于冬春季节沉积而成;牛新生等^[15]对荣玛地区温泉钙华进行氧同位素及微量元素测量,重建了西藏全新世以来古气候。

九寨沟作为典型的岩溶地貌景观,受水动力控制的碳酸钙沉积在生物(藻类和植物)参与的作用下^[10,16-18],形成举世闻名的地质遗迹,如钙化湖泊、滩流、瀑布景观、岩溶水系统景观等,具有极高的生态保护、科学研究和美学旅游价值^[19-23]。2017年8月8日21时19分,九寨沟县(N33.20°,E103.82°)发生7.0级地震,此次地震造成九寨沟自然保护区内大量山体垮塌,道路破坏,作为九寨沟核心景观的诺日朗瀑布严重损毁,水体一度断流。本课题组借助震后诺日朗瀑布水体断流期的特定条件,对瀑布坝体

基金项目:国家自然科学基金项目(41672206、41973053);地震动力学国家重点实验室开放基金(LED2016B07)

第一作者简介:张红敏(1997—),女,硕士研究生,主要从事第四纪沉积与环境变化研究。E-mail:1427226573@qq.com。

通信作者:赵学钦(1977—),男,博士,副教授,主要从事构造地质、第四纪地质相关研究。E-mail:zxqch@sina.com。

收稿日期:2020-09-20

开展了伽马辐射测量,同时对坝体进行取样,对样品开展主微量元素分析,研究钙华主微量元素与伽马值之间的关系,在此基础上,探讨大坝钙华沉积环境和条件,以期对钙华相关的古气候、古环境研究起到补充作用。

1 研究区概况

九寨沟景区位于青藏高原东部,青藏高原与四川盆地之间的过渡地带,该过渡带是中国第一、二级阶梯转折部位;大地构造上位于松潘—甘孜造山带与西秦岭造山带的结合部位,其主要构造线呈北西—南东向展布;景区以发育晚古生代及三叠纪地层为主,受不同方向及不同应力的构造作用干扰,断裂构造发育明显,其方位以北西向、北东向、南北向及近东西向四组最为典型(图1)。诺日朗瀑布位于景区中部,日则沟和则查哇沟交汇处,海拔为2 365 m,大坝高24.5 m,瀑布宽310 m,是九寨沟大型钙华瀑布之一。

2 研究方法

2.1 数据和样品获取

受地震影响,诺日朗瀑布钙华坝体垮塌长20 m,占瀑布宽度的6.25%(图2),在震后诺日朗瀑布水体断流期的特定条件下,对大坝开展精细测量。根据颜色变化,对垮塌体进行精细的分层,同时采用手持便携式自然伽马仪对大坝以及地震后掉落的钙华进行放射性测量。在诺日朗大坝坝体设置35个放射性测试点(点间距为0.5 m),并针对大坝顶部垮塌部分

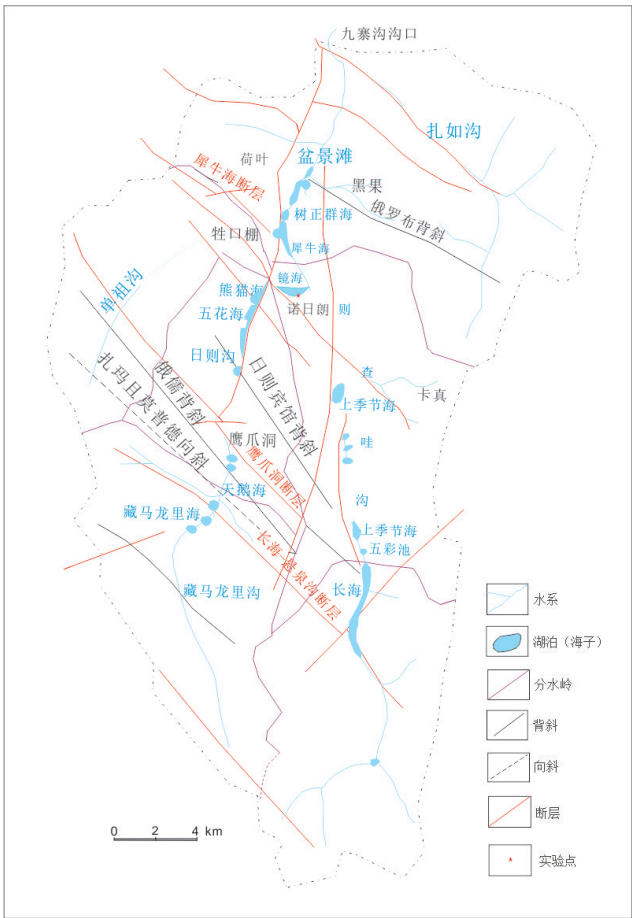


图1 九寨沟景区地质构造纲要略图(据四川省区调队,2006)
Fig. 1 Outline of the geological structure in Jiuzhaigou valley area

取样,共计6个钙华样品。此外,大坝顶部钙华受地震影响崩落,其掉落部分钙华分层明确,为提升数据的可靠性,增强伽马值与元素之间相关性的可信度,针对其进行取样,共计26个钙华样品。



图2 地震后诺日朗瀑布大坝(左:全景,右:局部)
Fig. 2 Nuorilang waterfall dam after the earthquake (left. panoramic, right. partial)

2.2 样品分析和测试

伽马辐射量测量设备采用北京核地科技发展有限公司所生产的HD-2000 GPS γ 辐射仪,仪器技术指标为:能量阈 40 keV,相对误差不超过 5%,非线性小

于 10%,伽马测量最大允许误差不超过 5%,检测范围在 1~30 000 Ur(当量铀)。主微量元素测试单位为广州澳实矿物实验室,采用 CM61-MS81 电感耦合等离子体质谱分析稀土微量元素以及 P61-XRF26sX 射线荧光光谱仪熔融法分析岩石主量(表 1)。

表 1 测试仪器信息
Table 1 Data of test instrument

方法代码	仪器	产地	品牌	仪器型号
	γ 辐射仪	北京		HD-2000 GPS
CM61-MS81	电感耦合等离子体发射光谱	美国	Agilent	5110
	电感耦合等离子体质谱	美国	Agilent	7700x
		美国	Agilent	7900
P61-XRF26s	电感耦合等离子体发射光谱	美国	Agilent	5110
	X 射线荧光光谱仪	荷兰	PANalytical	PW2424

3 结果与分析

3.1 大坝坝体钙华特征

地震导致诺日朗瀑布观景台附近发生部分坍塌,钙华崩塌体最大体积达 20 m³(图 3a,图 3b),坝顶崩塌体原位处出现一条宽 60 cm、深 7 m 的裂缝,裂缝底部有流水时形成管涌(图 2)。垮塌处大坝主

体高 16.35 m(图 3),底部 4.5 m 未受地震影响,基本被新生钙华覆盖,之上为垮塌形成的新鲜面。新鲜面底部为厚 4.0~5.0 m 的层状钙华;之上厚 4.0~4.5 m 为多孔钙华,生物骨架明显,多为树叶(图 3d),夹两套约 30 cm 的黑色粉土(样品 soil 1 和 soil 2),高 7.1 m;最上一层厚 3.0~3.5 m,疏松,成孔性差(3c)。



图 3 诺日朗瀑布大坝钙华
Fig. 3 Travertine of Nuorilang waterfall dam
a. 大坝垮塌体 b. 垮塌的层状钙华 c. 大坝顶部钙华 d. 钙华生物骨架

3.2 放射性伽马值测量结果

在不同环境条件下伽马辐射量存在明显的涨落,尤其是降雨时空气中氡子体的沉降,可导致伽马辐射量短时间内增加 50% 到 100%^[24],因此在考虑测试仪器本身误差的情况下针对下雨时测试的大坝掉

落部分钙华的伽马值数据不予采用,文中仅展示大坝伽马值测量的结果(图4)。为提高数据的可信度,在测量过程中针对每一个点分别测试8次,去掉其最高值、最低值,计算平均值作为最终的伽马值进行研究,测试结果如表2所示。

表2 诺日朗瀑布大坝伽马值测量结果(取值1 m)

Table 2 Gamma measurement results of Naurilang waterfall dam (valuation of 1 m)

位置	数据值/Ur								去掉最高值、最低值的平均值/Ur
16	32.40	28.20	28.00	30.40	28.70	25.70	21.20	26.00	27.83
15	26.50	19.30	26.00	32.70	28.00	24.50	28.70	33.90	27.73
14	36.90	28.00	29.90	30.20	30.40	32.20	30.90	31.40	30.83
13	27.20	25.00	27.20	27.70	27.00	28.90	28.10	25.50	27.12
12	26.00	27.00	25.50	28.00	25.00	25.70	29.90	22.80	26.20
11	32.90	32.70	27.00	28.70	32.90	31.20	31.20	29.70	31.07
10	23.50	29.70	28.90	28.00	25.70	29.70	29.90	28.00	28.33
9	32.90	29.20	29.70	30.40	29.70	26.70	31.90	29.70	30.10
8	32.20	29.40	29.90	34.20	34.90	30.20	29.40	31.70	31.27
7	27.20	28.20	25.70	27.20	25.50	27.20	28.70	27.20	27.12
6	25.00	29.20	25.50	28.00	29.70	25.00	26.20	30.70	27.27
5	27.70	28.00	26.00	31.40	25.70	29.20	30.20	32.90	29.22
4	29.40	29.20	29.70	28.70	31.70	29.70	27.50	29.40	29.35
3	31.90	34.90	32.70	26.70	40.60	30.70	28.20	28.50	31.15
2	27.20	31.90	33.40	25.70	26.20	30.20	27.50	28.20	28.53
1	28.50	28.20	26.20	30.20	33.20	26.00	28.10	24.20	27.87
0	28.00	28.00	28.20	24.20	27.20	23.70	26.00	26.70	26.68

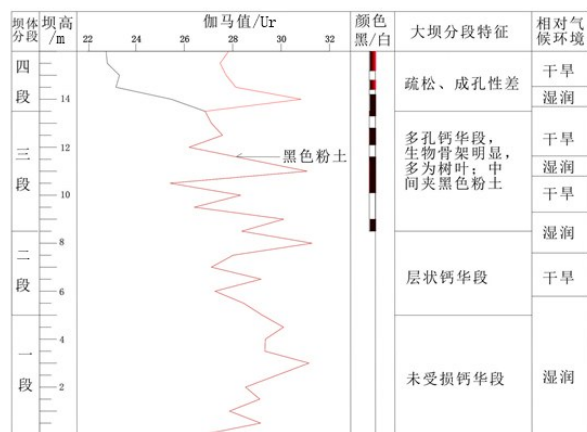


图4 诺日朗瀑布大坝伽马值测试结果

Fig. 4 Gamma test results of Naurilang waterfall dam

注:图中黑色线是去掉测量的第1个数据再取后面7个的平均值,红色线为8个数据去掉最大值和最小值之后的平均值。

统计结果表明,大坝表层伽马辐射量平均值为 27.57 Ur(当量铀),变异系数为 18.73%。伽马辐射

量数值主要集中在 28.0~31.0 Ur 之间,占测点总数的 81%。位于 27.0~28.0 Ur 区间的测点数占总测点数的 9%,位于 31.0~32.0 Ur 区间的测点数占总测点数的 10%,测区伽马辐射量分布基本不属于正态分布,峰度为-0.555,比正态分布的高峰来得平稳;偏度系数为 0.237,表明量值较低的数据占多数,这与测区内的地质条件(存在大面积第四系)有密切关系。但同时数据也存在一定数量的高值点(>31.0 Ur),则与测点的分布密度有直接关系,由于布置测点时客观条件的制约,会使得局部测点呈现不均一性,从而使得那种笼统的统计数值的代表性降低,此外,在“8·8”地震中,大坝上部受地震影响坝体多裂缝,与下部第四部分相比更破碎,在伽马值测量上,上部测量的值相对波动较大,同上部裂隙发育存在一定关系;同时,下部未受损坝体表层基本上覆盖了新生钙华,导致伽马值趋于稳定。

3.3 样品主量、微量元素测试结果

钙华主量元素数据结果(表3)表明,钙华中CaO含量最高为54.50%,最低为51.80%,平均为53.47%,CaO和烧失量之和的平均值达97.04%,指示方解石和文石的含量,表明大坝钙华主要成分为方解石,以及极少的石英(约占3%),同时烧失量较大表明大坝钙华有机物含量较高,钙华吸附水能力较强。SiO₂的平均含量为1.40%,但个别样品中该元素

含量较高,比如样品NRL-18的SiO₂达到了2.53%,而样品NRL-12的含量更是达到了2.68%。钙华的次要成分为Al₂O₃及MgO,平均含量分别为0.45%、0.34%,此外,SiO₂、MgO和TFe₂O₃这3种成分含量均表现为黑色纹层高于白色纹层。表3中分析成果与野外宏观资料结合(图3),发现钙华颜色为灰—褐色或褐色者,其中TFe₂O₃、MgO、MnO、TiO₂、Al₂O₃、SiO₂、Na₂O、K₂O、P₂O₅等氧化物含量均较高,说明钙华颜色与本身所含的色素元素与矿物有关。

表3 钙华主量元素数据(ω/%)
Table 3 Major element data of travertine (ω/%)

样品编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	烧失量	颜色
NRL-1	0.58	0.13	0.16	0.30	54.40	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	44.05	白
NRL-2	1.22	0.33	0.13	0.32	53.70	<0.01	0.06	<0.01	0.01	<0.01	43.63	黑
NRL-3	0.71	0.18	0.17	0.30	54.50	0.01	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	44.03	白
NRL-4	2.23	0.95	0.28	0.35	52.60	<0.01	0.15	0.01	0.03	<0.01	42.69	红
NRL-5	1.66	0.46	0.25	0.36	53.40	<0.01	0.08	0.01	0.02	<0.01	43.34	黑
NRL-6	0.97	0.24	0.21	0.31	54.20	<0.01	0.05	0.01	0.01	<0.01	43.72	白
NRL-7	1.00	0.24	0.17	0.32	53.70	<0.01	0.05	0.01	0.01	<0.01	43.85	白
NRL-8	1.09	0.25	0.16	0.30	53.80	<0.01	0.05	0.01	0.01	<0.01	43.75	黑
NRL-9	1.62	0.49	0.26	0.38	53.20	<0.01	0.08	0.01	0.02	<0.01	43.36	白
NRL-10	1.89	0.65	0.26	0.35	53.10	<0.01	0.10	0.01	0.02	<0.01	43.07	黑
NRL-11	1.60	0.67	0.26	0.35	53.20	<0.01	0.09	0.01	0.02	0.01	43.18	白
NRL-12	2.68	1.26	0.38	0.40	51.80	<0.01	0.15	0.01	0.04	<0.01	42.42	黑
NRL-13	2.08	0.87	0.32	0.38	52.70	<0.01	0.12	0.01	0.03	<0.01	42.82	白
NRL-14	1.44	0.61	0.22	0.34	53.30	<0.01	0.08	0.01	0.02	<0.01	43.52	白
NRL-15	1.47	0.48	0.21	0.34	54.00	<0.01	0.08	0.01	0.02	<0.01	43.55	白+黑
NRL-16	1.57	0.45	0.30	0.33	53.50	<0.01	0.08	0.01	0.01	<0.01	43.46	黑
NRL-17	1.68	0.44	0.19	0.37	53.50	<0.01	0.08	0.01	0.02	<0.01	43.46	白
NRL-18	2.53	0.67	0.25	0.37	52.50	<0.01	0.12	0.01	0.02	0.01	42.83	黑
NRL-19	1.57	0.45	0.20	0.34	53.50	<0.01	0.08	0.01	0.01	0.01	43.40	黑
NRL-20	1.52	0.43	0.26	0.34	53.40	<0.01	0.07	0.01	0.01	0.01	43.72	白
NRL-21	2.45	0.71	0.28	0.38	52.60	<0.01	0.12	0.01	0.02	0.01	42.95	黑
NRL-22	0.49	0.11	0.12	0.31	54.20	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	44.31	白
NRL-23	0.46	0.12	0.10	0.31	54.00	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	44.47	白
NRL-24	0.60	0.17	0.09	0.30	53.90	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	44.26	白
NRL-25	0.74	0.21	0.11	0.30	53.70	<0.01	0.04	<0.01	0.01	<0.01	44.24	黑
NRL-26	0.45	0.10	0.07	0.31	53.90	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	44.67	黑

大坝钙华的稀土元素总和(ΣREE)含量相对较低,各样品平均ΣREE为5.82×10⁻⁶,最高的NRL-12样品为15.13×10⁻⁶,样品NRL-22最低仅为1.57×10⁻⁶,轻稀土元素(LREE)介于1.52×10⁻⁶~13.91×10⁻⁶,均值为5.28×10⁻⁶,重稀土元素(HREE)介于0.05×10⁻⁶~1.22×10⁻⁶,均值为0.54×10⁻⁶,LREE与HREE比值介

于6.32×10⁻⁶~30.4×10⁻⁶,均值为10.29×10⁻⁶(表4)。

(La/Yb)_N是稀土元素标准化图解中曲线的总体斜率(图5),代表LREE和HREE的分异程度,大坝钙华(La/Yb)_N介于5.98~25.11,均值为11.68,表明其LREE富集特征,稀土元素之间发生分馏,与稀土元素迁移特性有关,HREE相较于LREE而言在水中迁

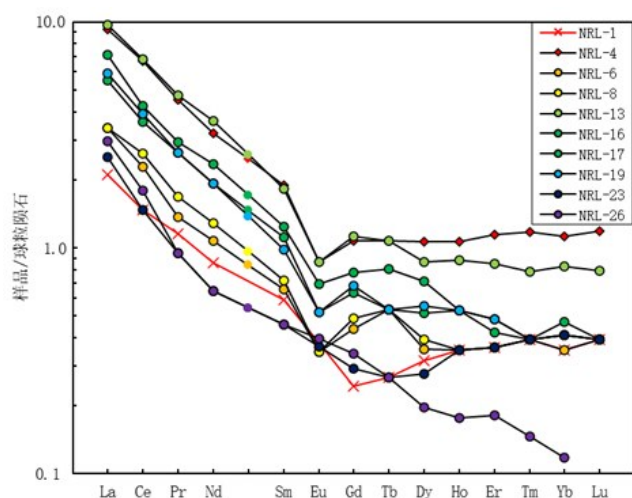


图5 稀土元素球粒陨石标准化分布型式图

Fig. 5 Standardized distribution pattern of rare earth element chondrites

移能力更强,导致 LREE 在钙华中相对富集。同时,铕异常系数(δ_{Eu})反映的是 Eu 元素的异常程度,样品的 δ_{Eu} 介于 0.00~1.05,平均为 0.68,整体显示诺日朗瀑布堆积的钙华 Eu 具有中等的负异常特征,其原因可能与区域的大地构造背景有关;铈异常系数(δ_{Ce})受不同沉积环境铁锰氧化物的丰度不同的影响,主要反映的是 Ce 异常的程度,其计算方法与 δ_{Eu} 相似,样品的 δ_{Ce} 介于 0.72~1.03,均值为 0.91。

4 讨论

4.1 钙华坝体沉积环境

诺日朗大坝钙华以黑灰色为主(图 3),其主要化学成分为 $CaCO_3$ (占 97.04%),次要成分为 SiO_2 (占 1.40%),属于典型的冷水钙华。常态下钙华颜色呈灰色,结构疏松,层次性差,内部多孔洞,树枝、树叶、苔藓、水草和藻类模板以及生物骨架发育,反映出沉积过程植物具有较高的参与度(图 3c,图 3d),大坝钙华在水动力条件适宜和植物与微生物共同参与下仍在沉积。此外,大坝顶部还夹杂着褐红色—浅黄—土黄色的杂色碎屑钙华层(图 3a,图 3d),其矿物成分与周围普通层无明显差异,但有机碳含量却较周围更高,原因可能是藻类和微生物残骸的存在。钙华经过弱风化之后,表现出一定的成层性(图 3b)。

根据样品的主量元素(表 3,图 6)和微量元素(表 4)分析,认为大坝钙华颜色与主量、微量元素含量相关,是多种因素导致的结果。诺日朗瀑布海拔 2400

余米,属湿润暖温带阔叶落叶林和针阔混交林,其上游土壤为山地棕壤,腐殖质积累量高^[25],大气降水作为九寨沟唯一的补给水源,雨季时,雨水冲刷土壤致使上游山地土壤中大量黏土矿物与植物碎屑混入水中,稀土元素随物质发生迁移,泥沙和 Fe、Al 等元素大量堆积的同时^[26],微生物在生长过程中捕获碳酸盐矿物和较之更低级的微生物菌类及碎屑,拦截元素的同时导致钙华颜色发生了变化,形成暗纹层,而亮纹层一般由纯净的方解石构成。此外,九寨沟钙华变黑还会受气候影响,在多雨季节,蓝藻依附于钙华表面而生长,使钙华颜色呈现为浅绿黄色,而在旱季时,上游镜海水量减少,在镜海与诺日朗之间发育有大量的钙华洞穴与漏斗,在拦截水流的同时,下部与地下集中径流带及管道相联通,形成地下渗流,使得下游诺日朗瀑布旱季时出现无水的状况,钙华体长期暴露于日光之下,其生长依附的藻类植物缺水而死亡,而钙华含有的大量有机质也在长时间暴露过程中被氧化,进而导致钙华体颜色呈黑色。

4.2 钙华放射性元素与伽马值之间的相关性

通过对比实验室样品分析的放射性元素(Pb、Th、Sr、K、U)和野外检测的实际伽马辐射量(图 7),发现除 Sr 元素以外,伽马值与 U、Th、K、Pb 4 个放射性元素之间成正相关,即放射性元素含量越丰富,其自然伽马辐射量也就越高。在沉积岩中,地层的泥质含量、有机质以及钾盐和某些放射性矿物的含量是影响自然伽马放射性强度的主要因素。在不同气候背景下,元素含量的变化必然会引起伽马值变化,通过对比伽马值与元素之间的关系,可推测钙华沉积环境的变化(图 4):在温暖湿润的气候条件下,一方面有利于植被的发育,以及微生物活动性增强,导致有机质和有机酸含量的增加;另一方面,地下水地表水水动力增强,其所含有的有机质、铁锰胶体以及颗粒物增加,元素搬运能力增强。伽马值越高代表其形成环境相对更湿润。因此,钙华的高精度伽马辐射分析可以成为研究古气候、古环境的良好手段。

4.3 钙华伽马值对古环境研究的意义

自然伽马能谱仪在钙华沉积环境研究方面具有较高的利用价值,但是受环境以及仪器本身的影响,在野外钙华沉积环境中,难以实现连续取点,在一系列外界不稳定因素的影响下,如天气变化、仪器不稳定、测点距离过近等,也容易使数据产生误差,导致结果与本身的实际情况不相符。因此,钙华作为一

表 4 钙华稀土元素数据($\omega/10^{-6}$)
Table 4 REE data of travertine ($\omega/10^{-6}$)

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	颜色
NRL-1	0.5	0.9	0.11	0.4	0.09	<0.02	0.05	0.01	0.08	0.02	0.06	0.01	0.06	0.01	白
NRL-2	1.3	2.0	0.20	0.8	0.15	0.03	0.14	0.02	0.13	0.03	0.08	0.01	0.07	0.01	黑
NRL-3	0.8	1.0	0.11	0.5	0.12	0.03	0.09	0.01	0.09	0.02	0.04	<0.01	0.06	<0.01	白
NRL-4	2.2	4.1	0.43	1.5	0.29	0.05	0.22	0.04	0.27	0.06	0.19	0.03	0.19	0.03	红
NRL-5	1.5	2.4	0.27	1.0	0.17	0.04	0.16	0.03	0.18	0.04	0.12	0.02	0.12	0.02	黑
NRL-6	0.8	1.4	0.13	0.5	0.10	0.02	0.09	0.02	0.09	0.02	0.06	0.01	0.06	0.01	白
NRL-7	0.8	1.4	0.14	0.5	0.11	0.02	0.09	0.02	0.09	0.02	0.06	0.01	0.06	0.01	白
NRL-8	0.8	1.6	0.16	0.6	0.11	0.02	0.10	0.02	0.10	0.02	0.06	0.01	0.07	0.01	黑
NRL-9	1.6	2.9	0.33	1.2	0.22	0.04	0.13	0.02	0.14	0.03	0.08	0.01	0.07	0.01	白
NRL-10	1.8	3.2	0.35	1.3	0.24	0.04	0.16	0.03	0.17	0.04	0.11	0.02	0.12	0.02	黑
NRL-11	2.0	3.7	0.37	1.4	0.25	0.05	0.16	0.03	0.18	0.04	0.12	0.02	0.13	0.02	白
NRL-12	3.4	6.5	0.72	2.7	0.51	0.08	0.34	0.05	0.30	0.07	0.19	0.03	0.21	0.03	黑
NRL-13	2.3	4.2	0.45	1.7	0.28	0.05	0.23	0.04	0.22	0.05	0.14	0.02	0.14	0.02	白
NRL-14	1.5	2.9	0.30	1.1	0.29	0.08	0.15	0.02	0.14	0.03	0.07	0.01	0.07	0.01	白
NRL-15	1.2	2.3	0.27	1.0	0.17	0.03	0.14	0.02	0.13	0.03	0.07	0.01	0.07	0.01	白+黑
NRL-16	1.3	2.2	0.25	0.9	0.17	0.03	0.13	0.02	0.13	0.03	0.08	0.01	0.08	0.01	黑
NRL-17	1.7	2.6	0.28	1.1	0.19	0.04	0.16	0.03	0.18	0.03	0.07	0.01	0.07	0.01	白
NRL-18	2.3	3.9	0.42	1.6	0.26	0.05	0.24	0.04	0.22	0.05	0.14	0.02	0.13	0.02	黑
NRL-19	1.4	2.4	0.25	0.9	0.15	0.03	0.14	0.02	0.14	0.03	0.08	0.01	0.07	0.01	黑
NRL-20	1.2	2.0	0.24	0.9	0.17	0.03	0.12	0.02	0.12	0.03	0.08	0.01	0.08	0.01	白
NRL-21	1.8	3.4	0.37	1.4	0.26	0.05	0.19	0.03	0.19	0.04	0.12	0.02	0.13	0.02	黑
NRL-22	0.5	0.7	0.07	0.2	0.05	<0.02	<0.05	0.01	<0.05	0.01	<0.03	<0.01	0.03	<0.01	白
NRL-23	0.6	0.9	0.09	0.3	0.07	<0.03	0.06	0.01	0.07	0.02	0.06	0.01	0.07	0.01	白
NRL-24	0.6	1.1	0.12	0.4	0.10	<0.02	0.10	0.02	0.10	0.02	0.05	<0.01	0.04	<0.01	白
NRL-25	1.7	2.5	0.29	1.0	0.18	0.05	0.18	0.03	0.20	0.04	0.12	0.02	0.12	0.02	黑
NRL-26	0.7	1.1	0.09	0.3	0.07	<0.02	0.07	0.01	0.05	0.01	0.03	<0.01	0.02	<0.01	黑

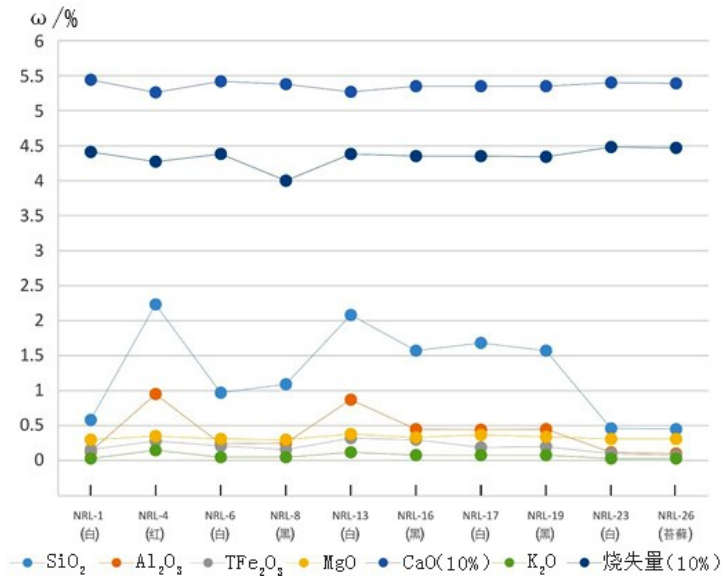


图 6 钙华中主量元素含量图
Fig. 6 Content of major elements in travertine

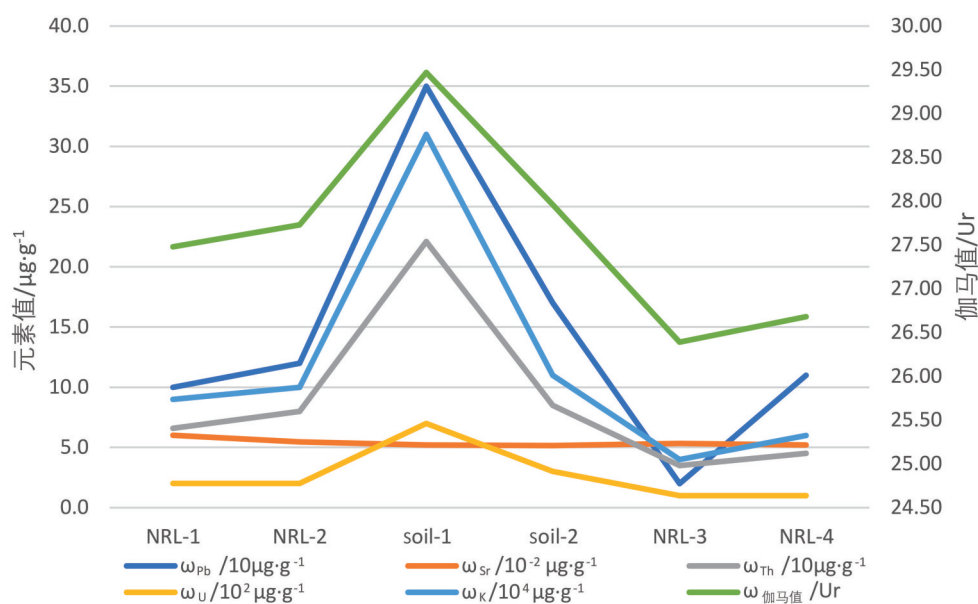


图7 钙华中的放射性元素Pb、Th、Sr、K、U含量

Fig. 7 Contents of radioactive elements Pb, Th, Sr, K and U in travertine

种理想的古气候、古环境记录载体,有必要在对其沉积形成气候环境进行深刻把握的基础上,充分利用伽马测量的特性,提升测量的准确性,正确认识测量数据背后的意义,丰富古气候、古环境认识方法。

5 结 论

(1)九寨沟诺日朗瀑布大坝钙华颜色与本身所含的色素元素和矿物有关,大坝钙华(La/Yb)N介于8.57~14.93,均值为11.78,其轻稀土元素富集。其颜色的形成是多因素共同作用的结果,包括微量元素含量、气候变化、降水量大小以及水生植物种类和生长状况等。雨季时,水生植物拦截的作用导致大量Fe、Al、泥沙以及植物碎屑的堆积,在丰富钙华本身元素含量的同时也导致了钙华颜色的改变,相对于旱季其颜色更为深暗;

(2)诺日朗瀑布大坝表层伽马辐射量平均值为27.57 Ur(当量铀),变异系数为18.73%,其钙华放射性元素含量与颜色以及伽马值之间存在正相关性,伽马值越高代表其形成气候环境相对更湿润,在该条件下沉积而成的钙华元素更为丰富,颜色也更为深暗。

参考文献

- [1] Pentecost A. Travertine [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2005.
- [2] 牛新生,郑绵平,刘喜方,等. 青藏高原钙华沉积属性特征及

其地质意义[J]. 科技导报, 2017, 35(6): 59-64.

- [3] Livnat A, Kronfeld J. Reply to comment on "Travertines of the arid regions, oxygen isotope stages, and late Quaternary climate of Israel" by A. Horowitz [J]. Quaternary Research, 1987, 27(1): 106-107.
- [4] Auler A S, Smart P L. Late Quaternary Paleoclimate in Semi-arid Northeastern Brazil from U-Series Dating of Travertine and Water-Table Speleothems [J]. Quaternary Research, 2001, 55(2): 159-167.
- [5] Matsuoka J, Kano A, Oba T, et al. Seasonal variation of stable isotopic compositions recorded in a laminated tufa, SW Japan [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 192(1): 31-44.
- [6] 王华,杨更,覃嘉铭,等. 四川黄龙大湾—张家沟钙华沉积剖面的古气候记录研究[J]. 地球学报, 2007, 28(5): 469-474.
- [7] 刘再华. 表生和内生钙华的气候环境指代意义研究进展[J]. 科学通报, 2014, 59(23): 2229-2239.
- [8] 安培浚,张志强,王立伟. 地球关键带的研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(12): 1228-1234.
- [9] Lin H. Earth's Critical Zone and hydrogeology: concepts, characteristics, and advances [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 6(1): 3417-3481.
- [10] Lugli S, Tang Y, Reghizzi M, et al. Seasonal pattern in the high-elevation fluvial travertine from the Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, southwestern China [J]. Journal of Sedimentary Research, 2017, 87(3): 253-271.
- [11] 刘再华,李红春,游镇烽,等. 云南白水台现代内生钙华微层的特征及其古气候重建意义[J]. 地球学报, 2006, 27(5): 479-486.
- [12] 刘再华,张美良,游省易,等. 碳酸盐沉积溪流中地球化学指标的空间分布和日变化特征:以云南白水台为例[J]. 地球化学, 2004, 33(3): 269-278.

- [13] 王华,覃嘉铭,安德军,等. 黄龙钙华 ^{210}Pb 计年与现代沉积的环境变化研究[J]. 地球学报,2010,31(2): 216-222.
- [14] 覃建勋,韩鹏,车晓超,等. 利用荣玛地区温泉钙华 $\delta^{18}\text{O}$ 及微量元素重建西藏全新世以来古气候[J]. 地学前缘,2014,21(2): 312-322.
- [15] 牛新生,刘喜方,陈文西. 西藏多格错仁南岸钙华地球化学特征与钾盐地质意义[J]. 沉积学报,2013, 31(6): 1031-1040.
- [16] 晏浩,刘再华,邓责平,等. 四川九寨沟景区钙华起源初探[J]. 中国岩溶,2013, 32(1): 15-22.
- [17] 晏浩,刘再华. 层状钙华及其地球化学指标的古气候/环境意义[J]. 第四纪研究,2011, 31(1): 88-95.
- [18] 张瑞英,何政伟. 四川九寨沟景观形成演化趋势分析及评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(1): 54-58.
- [19] Schwartz M W, Dolanc C R, Hui G, et al. Forest structure, stand composition, and climate-growth response in Montane Forests of Jiuzhaigou National Nature Reserve, China [J]. Plos One,2013, 8(8): e71559.
- [20] Urgenson L, Schmidt A H, Combs J, et al. Traditional Livelihoods, Conservation and Meadow Ecology in Jiuzhaigou National Park, Sichuan, China [J]. Human Ecology, 2014, 42(3): 481-491.
- [21] Zhang J, Zhao L P. On Internationally Marketing Jiuzhaigou National Park After Wenchuan Earthquake [J]. Journal of China Tourism Research,2010, 6(3): 310-324.
- [22] 郭建强,彭东,曹俊,等. 四川九寨沟地貌与第四纪地质[J]. 四川地质学报,2000(3): 183-192.
- [23] 郭卫星. 川西北自然风景中钙华景观的形成与发育[J]. 山地研究,1988,6(1): 54-60.
- [24] 郑国栋,宋建锋,杨维耿. 环境 γ 辐射连续监测系统数据分析及探讨[J]. 中国辐射卫生,2013, 22(1): 85-87.
- [25] 林致远,尹平. 九寨沟土壤发生及地理分布规律研究[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,1994, 19(1): 90-99.
- [26] 刘再华,田友萍,安德军,等. 世界自然遗产—四川黄龙钙华景观的形成与演化[J]. 地球学报,2009, 30(6): 841-847.

Radioactivity of Nuorilang waterfall travertine dam in Jiuzhaigou valley, Sichuan Province and its implication for the sedimentary environment

ZHANG Hongmin^{1,2}, ZHAO Xueqin^{1,2}, WANG Fudong^{1,2}, WU Changda^{1,2}, LI Song^{1,2}

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Institute of Land and Resources Utilization, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract Travertine is a good carrier for the study of paleo-climate and paleo-environment. A portable hand-held gamma meter was used to measure the radioactivity in the Nuorilang waterfall travertine dam in Jiuzhaigou valley. Combined with the analysis of the major and trace elements in the travertine samples, the environment of the dam was studied. Results show that the gamma radiation on the surface of the dam averages 27.57 Ur and the variation coefficient is 18.73%. The travertine color is associated with color elements contained and minerals. (La/Yb) N of dam travertine is between 8.57—14.93, 11.78 on average, with a feature of light rare element enrichment. Analysis suggests that the color of dam travertine resulted from multiple factors, including the content of trace elements, climate change, precipitation, and the types and growth of aquatic plants. There is a positive correlation between the content of radioactive elements, travertine color and gamma values. Thus the gamma value can be used to infer the deposition environment of travertine, i.e. the higher the gamma value, the moister the environment is.

Key words Jiuzhaigou valley, Nuorilang waterfall, natural gamma, microelement, sedimentary environment

(编辑 黄晨晖)