

王万能,李锁明,张耀堂,等.滇中禄丰川街盆地中—晚侏罗世温室地球气候环境演变特征及其对生物埋藏的影响.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1530-1543.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230181.

Wang Wanneng, Li Suoming, Zhang Yaotang, et al. Characteristics of the Middle-Late Jurassic Greenhouse Earth Climate Environment Evolution in Lufeng Chuanjie Basin, Central Yunnan, and Its Impact on Bioburial. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1530-1543. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230181.

滇中禄丰川街盆地中—晚侏罗世温室地球气候环境演变特征及其对生物埋藏的影响

王万能,李锁明,张耀堂,袁永盛,庞占基,赵见波

中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心,昆明 650000

摘要:滇中禄丰地区川街盆地记录了上扬子地区中—上侏罗统陆相沉积和生物演化的重要信息,为侏罗纪温室地球气候环境研究提供了良好载体。本文通过对川街盆地中—晚侏罗世陆相红层进行沉积学、碳-氧同位素、微量元素地球化学系统研究,恢复其古气候环境特征。研究认为:禄丰地区侏罗纪巴通期—卡洛夫早期湖泊为封闭性较好、盐度逐渐升高的咸水湖,该时期气候由相对湿润转为干燥,气温总体较高,从早期到晚期表现为温度逐渐降低的趋势;卡洛夫中—晚期湖泊封闭性减弱,由咸水湖转为半咸水湖,该阶段气候由干燥向相对湿润气候转变,温度回升,但气候波动剧烈,干湿交替频繁;牛津期—提塘期湖泊封闭性进一步减弱,为半咸水湖泊,气候总体趋于稳定,为湿润型气候。本次工作在禄丰地区陆相红层中识别出中—晚侏罗世过渡期寒冷事件(即 MLJT 事件),为中生代温室地球气候环境研究和西南地区陆相红层对比研究提供了重要参考。中侏罗世晚期急剧变化的气候使得生物快速死亡,加之暴雨期河流的搬运、沉积和快速埋藏,造成了川街盆地如今的生物埋藏特征。

关键词:禄丰地区;中—晚侏罗世;陆相红层;温室地球;古气候;古环境;川街盆地

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230181

中图分类号:P951;P66

文献标志码:A

Characteristics of the Middle-Late Jurassic Greenhouse Earth Climate Environment Evolution in Lufeng Chuanjie Basin, Central Yunnan, and Its Impact on Bioburial

Wang Wanneng, Li Suoming, Zhang Yaotang, Yuan Yongsheng, Pang Zhanji, Zhao Jianbo
Kunming Natural Resources Comprehensive Investigation Center, China Geological Survey, Kunming 650000, China

Abstract: The Chuanjie basin in the Lufeng area of central Yunnan has recorded important information on the continental sedimentation and biological evolution of the Middle-Upper Jurassic in the

收稿日期:2023-07-23

作者简介:王万能(1995-),男,工程师,主要从事区域地质调查方面的研究,E-mail:1922637474@qq.com

通信作者:袁永盛(1988-),男,高级工程师,主要从事区域地质调查方面的研究,E-mail:879933153@qq.com

基金项目:中国地质调查局项目(DD20220987)

Supported by the Project of China Geological Survey (DD20220987)

Upper Yangtze region, providing a good carrier for the study of the Jurassic greenhouse earth climate environment. In this paper, the sedimentary, carbon-oxygen isotope and trace element geochemical systems of the Middle-Late Jurassic continental red beds in Chuanjie basin were studied to restore their paleoclimatic and environmental characteristics. Research suggests that the Jurassic Batonian to Early Kalo lakes in the Lufeng region were saline lakes with good sealing and gradually increasing salinity. During this period, the climate changed from relatively humid to dry, and the temperature was generally higher, showing a trend of gradually decreasing temperature from the early to late stages. The closure of the lake in the middle to late stages of the Kalo period weakened, making it a semi saline lake. During this stage, the climate changed from dry to relatively humid, and the temperature rose. However, the climate fluctuated violently, with frequent dry-wet alternations. During the Oxford Titang period, the lake's closure further weakened and became a semi saline lake, with a generally stable humid climate. This work identified the Middle-Late Jurassic transition cold event (MLJT event) in the terrestrial red beds of the Lufeng area, providing an important reference for the study of the Mesozoic greenhouse earth climate environment and the comparative study of the terrestrial red beds in Southwestern China. The rapid change of climate in the late Middle Jurassic led to the rapid death of organisms, coupled with the transportation, sedimentation and rapid burial of rivers during the rainstorm period, resulting in the present biological burial characteristics of the Chuanjie basin.

Key words: Lufeng area; Middle-Late Jurassic; terrestrial red layer; greenhouse earth; paleoclimate; palaeoenvironment; Chuanjie basin

0 引言

近些年来国内外各种极端天气的频发,地表的持续升温,给人类赖以生存的环境带来了巨大的挑战。大量研究表明,地球正在逐步向温室地球气候环境演变^[1-5],因此“温室地球”的研究越来越被科学界所重视,了解地质历史上出现的温室地球时期的气候环境,才能对其未来的发展做出科学合理的预测和相应的准备。侏罗纪作为地质历史时期典型的温室气候时期,为人类了解温室地球气候环境提供了重要参考。前人^[1-5]针对该时期海相地层进行了大量的气候环境研究与恢复,在全球海水温度、海平面变化等方面取得了重要研究成果。但对该时期陆相湖泊所反映的气候演化特征研究较为薄弱,制约着人们对侏罗纪时期海、陆环境气候的全面了解。

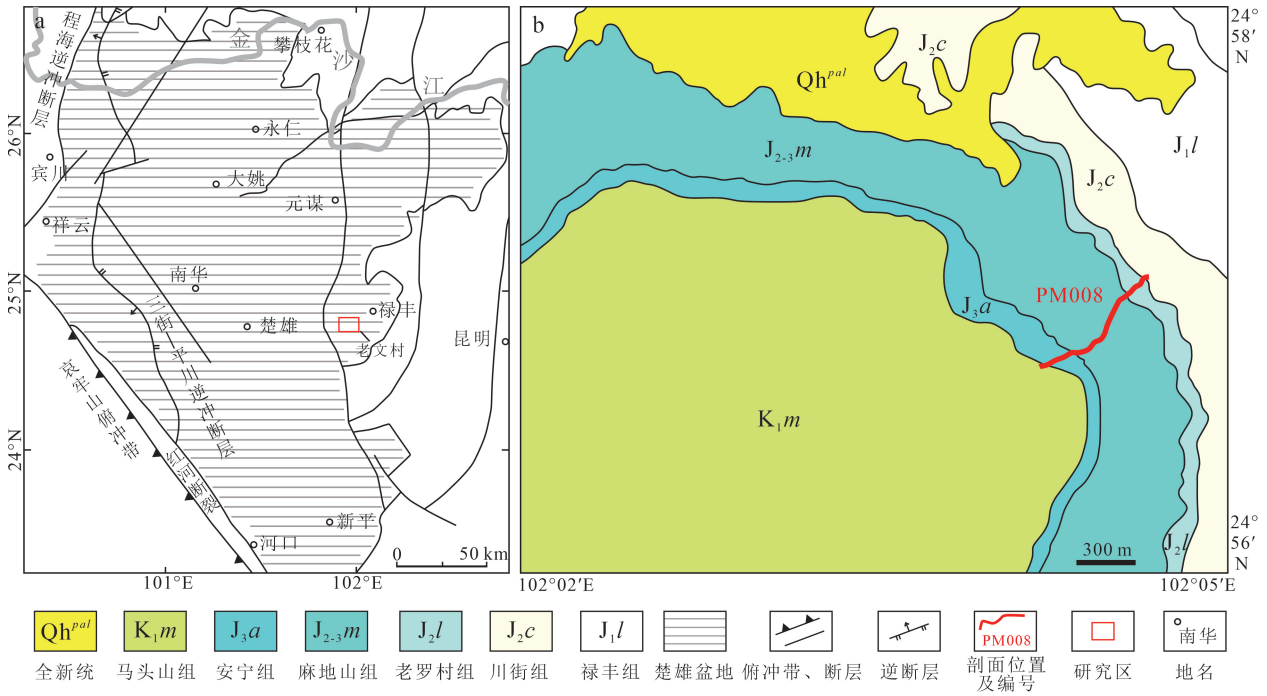
云南省中部禄丰地区中一晚侏罗世陆相沉积连续,且沉积以泥岩和泥灰岩为主,是研究该时期陆相环境气候的适宜场所;同时禄丰地区中一晚侏罗世发现大量的鱼类、恐龙及恐龙足迹化石^[6-10],对其进行气候环境方面的研究,不仅有助于了解中一晚侏罗世禄丰地区的温室地球气候环境演变规律,更有助于了解该时期生物的生存环境条件。本次研究针对该地区的湖相红层,利用稳定碳-氧同位素及岩石

地球化学等方法进行研究,探讨禄丰地区中一晚侏罗世湖泊的封闭性、古盐度及古温度等气候环境特征,重建中一晚侏罗世古气候和古环境,为中一晚侏罗世陆地温室气体气候环境的研究与重建提供参考。

1 区域地质概况及地层划分

研究区大地构造位置位于上扬子西缘,楚雄陆内盆地和康滇基底断隆带接壤的滇中禄丰地区,地层区划隶属华南地层大区扬子地层区康滇地层分区之昆明地层小区,区内出露元古宇和中生界。元古宇总体为一套陆棚相粉砂岩-泥岩建造和台地碳酸盐岩建造,具有轻微区域变质现象。中生代总体为陆相三角洲-湖泊-河流相陆源碎屑沉积。侏罗纪总体沉积了一套陆相红色碎屑岩层。

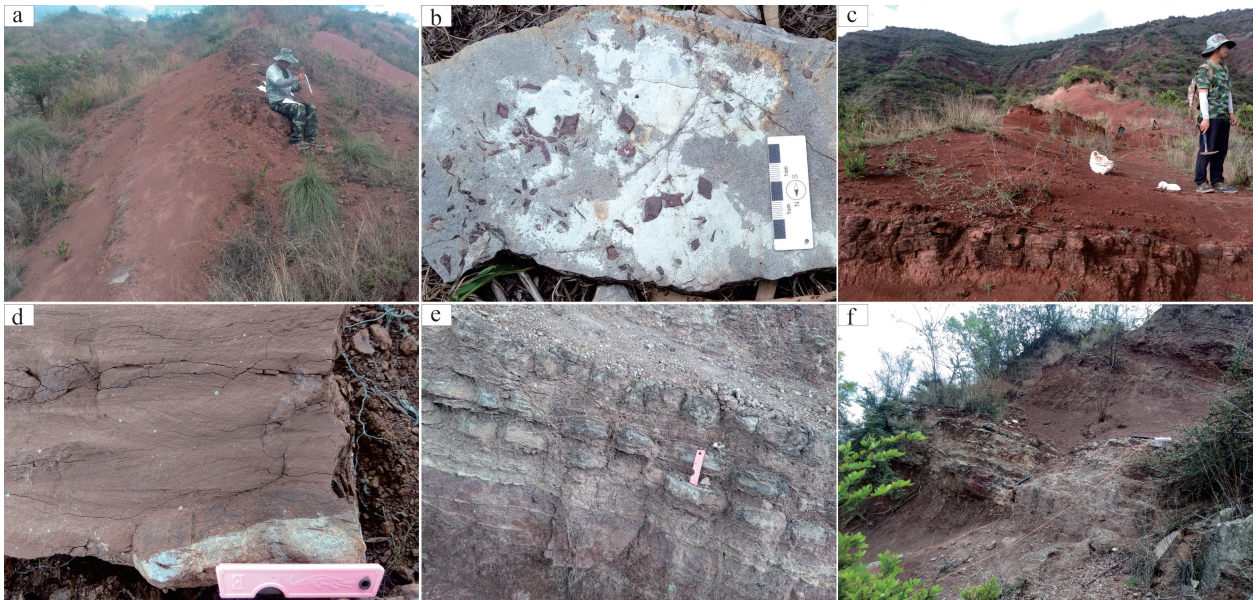
研究区位于云南禄丰市恐龙山镇老文村一带(图1a),出露地层自下而上依次为侏罗系禄丰组、川街组、老罗村组、麻地山组、安宁组和白垩系马头山组(图1b)。本次工作主要测制老罗村组、麻地山组和安宁组。老罗村组岩性为酒红、紫红色中厚层状泥岩与灰绿、灰黄色钙质泥岩互层(图2a),含丰富的鱼鳞化石(图2b),发育水平层理;麻地山组岩性为酒红、紫红色中厚层状钙质泥岩夹中薄层状粉砂岩(图2c),粉砂岩中发育交错层理(图2d),



a 图据文献[11]修编。

图 1 研究区位置 (a) 及地质图 (b)

Fig.1 Location (a) and geological map (b) of the study area



a. 老罗村组; b. 老罗村组鱼鳞化石; c. 麻地山组; d. 麻地山组交错层理; e. 安宁组; f. 安宁组。

图 2 滇中禄丰老文村剖面中—上侏罗统野外宏观特征

Fig.2 Field macroscopic characteristics of Middle-Upper Jurassic in Laowen Village section of Lufeng, central Yunnan

泥岩中可见方解石晶洞;安宁组岩性为酒红、紫红色 剖面如图 3 所示,各组详细沉积特征如下。钙质泥岩夹灰绿、灰白色泥岩及泥灰岩(图 2e、f)。

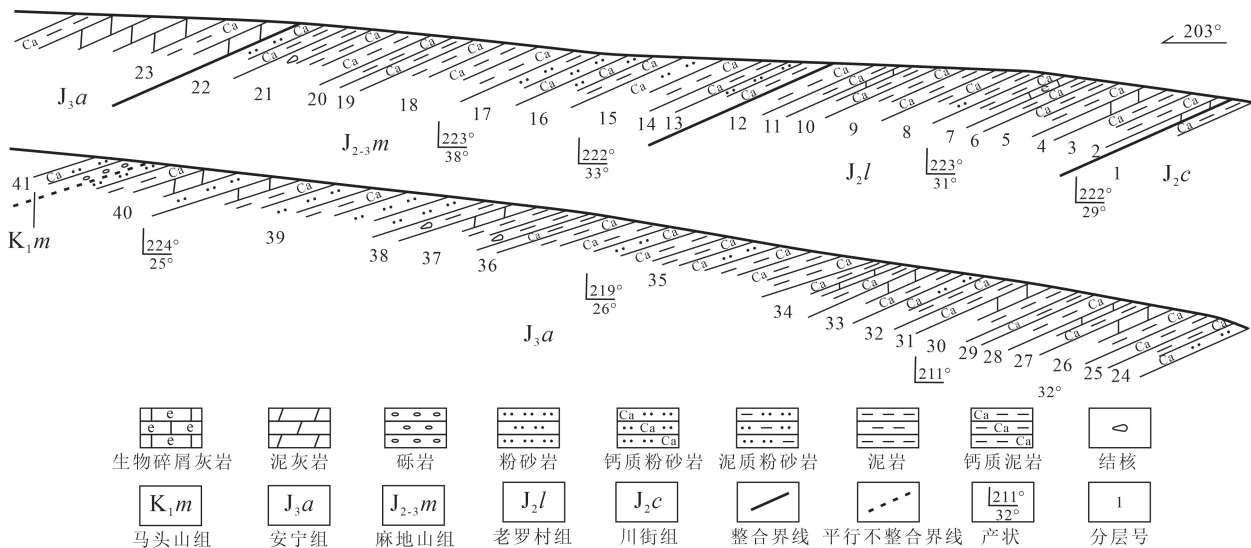


图 3 滇中禄丰老文村中—上侏罗统剖面图

Fig.3 Profile map of Middle-Upper Jurassic in Laowen Village section of Lufeng, central Yunnan

马头山组:

- 41. 红褐色块状复成分砾岩,上部为砖红色块状钙质含砾粉砂岩 7.4 m
- 平行不整合接触 ———

安宁组:

- 40. 紫红色厚层状粉砂岩与灰绿、砖红色薄层状钙质泥岩互层,夹一层泥灰岩 10.2 m
 - 39. 底部为紫红色厚层状粉砂岩,往上为灰绿、砖红色薄层状钙质泥岩互层,顶部为一层泥灰岩 3.5 m
 - 38. 砖红色块状钙质泥岩夹紫红色薄层状钙质泥岩,泥岩中发育钙质结核,顶部为一层灰绿色泥灰岩 23.7 m
 - 37. 灰绿色中厚层泥灰岩与紫红色块状泥岩互层,中下部含大量钙质结核 19.4 m
 - 36. 酒红色块状钙质泥岩,可见灰绿色斑块,含大量薄片状方解石 8.8 m
 - 35. 砖红色厚层状钙质粉砂岩与灰绿色薄层状钙质泥岩互层 5.1 m
 - 34. 灰绿、灰白、紫红色薄层状钙质泥岩互层,中间夹一层灰白色泥灰岩 7.8 m
 - 33. 酒红色块状泥岩夹灰绿色中薄层泥灰岩,往上灰岩逐渐减少 13.3 m
 - 32. 酒红色块状钙质泥岩偶夹灰绿色中薄层钙质粉砂岩、泥岩 22.4 m
 - 31. 酒红色块状钙质泥岩,底部含大量方解石晶洞,上部可见灰绿色斑块 21.3 m
 - 30. 灰绿、紫红色薄层状泥岩与灰绿色薄层状泥灰岩互层,发育水平层理 3.5 m
 - 29. 酒红、紫红色厚层钙质泥岩与紫红色薄层钙质粉砂岩互层 1.4 m
 - 28. 酒红色块状钙质泥岩夹一层厚 10 cm 的灰绿色薄层状钙质泥岩,底部含大量钙质结核 9.8 m
 - 27. 酒红、灰绿色中薄层状钙质泥岩与灰绿色、酒红色泥灰岩互层,发育水平层理及小型交错层理 8.0 m
 - 26. 灰绿色中薄层泥灰岩与酒红色块状钙质泥岩互层 15.0 m
 - 25. 酒红色块状钙质泥岩夹钙质粉砂岩、少量灰绿色中薄层钙质泥岩 38.1 m
 - 24. 酒红色块状钙质泥岩夹同色中层状钙质粉砂岩,比例为 15 : 1~20 : 1,泥岩中发育大量方解石晶洞 18.9 m
 - 23. 底部为酒红色薄层状泥灰岩夹薄层钙质泥岩,上部为紫红色、酒红色、灰绿色薄层状泥岩与灰绿色、灰紫色薄中层状泥灰岩互层。泥岩发育水平层理。可见介形虫化石 1.0 m
- 整合接触 ———

麻地山组:

- 22. 酒红色中厚层状钙质泥岩,顶部夹中薄层钙质粉砂岩,发育水平层理、交错层理,中上部及顶部见大量钙质结核,含方解石晶洞 50.3 m
- 21. 酒红色块状钙质泥岩,顶部见大量钙质结核 25.9 m

20.	酒红色厚层-块状钙质泥岩夹中薄层钙质粉砂岩,发育水平层理及交错层理,顶部见大量钙质结核	75.5 m
19.	灰紫、灰绿色极薄层状钙质泥岩,发育水平层理	1.2 m
18.	酒红色块状钙质泥岩,顶部可见大量钙质脉	13.5 m
17.	下部为灰绿色中层状钙质粉砂岩,上部为紫红色薄层状泥质粉砂岩,发育水平层理	1.5 m
16.	酒红色块状钙质泥岩偶夹薄层状钙质粉砂岩,泥岩中可见垂直层面的钙质脉穿插	40.4 m
15.	酒红色中厚层钙质泥岩偶夹灰绿色中薄层钙质粉砂岩,发育交错层理	14.1 m
14.	灰紫、酒红色厚层-块状钙质泥岩互层,含大量灰绿色斑状构造	13.1 m
13.	酒红色厚层-块状钙质泥岩夹粉砂岩,含少量灰绿色钙质结核	21.0 m
—————整合接触—————		

老罗村组:

12.	酒红色块状钙质泥岩,顶部为灰绿色钙质泥岩	2.4 m
11.	酒红、浅灰紫色厚层-块状钙质泥岩	14.6 m
10.	灰紫色厚层状钙质泥岩夹酒红色中层状钙质泥岩,顶部为一层泥灰岩	1.0 m
9.	紫红、酒红色厚层-块状钙质泥岩与灰紫、灰绿色中厚层状钙质泥岩互层	22.6 m
8.	灰绿、灰紫色中厚钙质泥岩夹酒红色厚层状钙质泥岩、粉砂质泥岩	20.2 m
7.	灰绿、灰紫色中厚层状钙质泥岩夹薄层生物碎屑灰岩,含大量鱼鳞、骨屑化石	11.5 m
6.	灰紫、紫红色中厚层状钙质泥岩夹少量灰绿色薄层钙质泥岩	13.2 m
5.	灰绿、紫红色厚层状钙质泥岩,顶部发育方解石脉,含少量鱼鳞化石	26.1 m
4.	灰白、灰紫、灰绿色中厚层状泥灰岩,呈不规则网脉状	3.9 m
3.	紫红色厚层状钙质泥岩,可见灰白色钙质脉穿插	8.8 m
2.	灰紫、灰白色中薄层状泥灰岩,可见虫迹化石,鱼鳞碎片	2.8 m
—————整合接触—————		

川街组:

1.	紫红色厚层状钙质泥岩,可见灰绿色不规则状斑状构造	1.6 m
----	--------------------------	-------

2 样品采集与测试方法

为了避免样品受到风化和氧化作用的影响,所有样品均采自露头深处的新鲜钙质泥岩,共计 63 件样品。样品元素分析在中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心实验室进行测定。使用 Axios X 射线荧光光谱仪(XRF, Panalytical B.V)测试主要元素,使用 ICAP-QC 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Thermo Fisher Scientific)和 ICAP6300 电感耦合等离子体-光发射光谱仪(ICP-OES, Thermo Fisher Scientific)进行微量元素分析,精度优于 $\pm 5\%$ 。

3 测试结果

微量元素的质量分数及比值关系等在一定程度上受控于沉积环境和气候背景,它们与周围物理化学条件之间存在着复杂的地球化学平衡^[4,12],因此,在古气候、古环境的分析中,沉积物中一些敏感元素显得尤为重要,同时,碳-氧同位素的介入,为气候环境的分析提供了更为充分的依据。测试结果见表 1 和表 2。

3.1 湖泊开放性

一般认为 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的判定系数小于 0.7 时,为开放的古湖泊类型,大于 0.7 则为相对封闭的古湖泊类型^[13-14]。老罗村组判定系数为 0.82(图 4a),属于封闭性湖泊,说明当时的湖泊处于相对封闭的环境,该阶段气候干旱,蒸发作用极为强烈,导致湖泊萎缩。而麻地山组和安宁组判定系数分别为 0.61 和 0.60(图 4b、c),属于开放的湖泊类型。自下而上湖泊表现为逐渐开放的趋势。

3.2 古盐度

大气中 CO_2 体积分数很低,溶解在淡水中的 CO_2 多来源于为高负值的土壤和腐殖质中 $\delta^{13}\text{C}$,因此淡水湖泊和河流中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值很低。前人^[14]研究指出,淡水碳酸盐沉积物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -15% ~ -5% 之间,海相碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则介于 -5% ~ 5% 之间,而且 $\delta^{13}\text{C}$ 值与水体盐度呈正相关,值越大,水体盐度越高。如图 5 所示,老罗村组表现为盐度较高的咸水湖;麻地山组盐度虽然较老罗村组有较低幅度下降,但总体表现为咸水环境;安宁组则含盐度较低,表现为盐度较低的淡水-半咸水。

表1 研究区中一晚侏罗世钙质泥岩样品地球化学分析数据

Table 1 Geochemical data of Middle-Late Jurassic calcareous mudstone samples in the study area

编号	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	As	B	Cr	Cu	Ga	Hg	Ni	Sc	Sr	Th	U	V
1	15.33	9.83	3.67	0.42	8.35	102.0	97.1	19.9	19.7	0.006	53.2	16.1	142	13.4	2.71	124.0
2	12.44	11.63	2.87	0.46	2.91	84.1	77.6	40.2	14.9	0.006	40.0	12.0	181	11.2	2.68	113.0
3	15.76	7.92	3.96	0.48	12.00	105.0	248.0	24.5	20.9	0.009	50.2	16.7	152	14.2	3.05	124.0
4	11.53	15.36	2.76	0.42	2.32	90.8	118.0	34.0	14.2	0.011	33.3	11.0	242	10.2	2.50	103.0
5	16.31	5.77	4.02	0.55	11.90	108.0	101.0	15.6	21.9	0.009	51.2	17.3	122	14.2	2.73	128.0
6	10.77	19.00	2.31	0.16	4.06	64.9	67.4	50.0	13.6	0.010	30.9	10.9	255	9.4	5.87	94.2
7	9.02	19.82	2.44	0.22	2.43	88.5	57.2	15.3	11.5	0.006	24.9	9.4	307	8.6	2.27	75.1
8	10.70	18.05	3.00	0.24	6.28	91.6	69.8	14.0	13.7	0.004	33.1	11.5	362	9.9	2.46	83.9
9	10.65	11.30	2.68	0.62	5.94	80.1	65.9	15.8	13.5	0.009	31.3	10.6	187	10.1	2.31	76.8
10	9.46	19.30	2.04	0.32	4.62	58.8	54.9	12.6	10.4	0.004	24.2	8.3	314	8.8	2.24	72.0
11	7.59	19.45	2.01	0.30	2.12	76.8	56.6	15.9	12.2	0.016	23.3	9.3	354	9.0	2.42	69.6
12	11.37	12.58	3.26	0.42	9.15	117.0	67.8	8.4	13.7	0.008	34.5	11.1	155	10.8	2.11	81.6
13	13.66	9.78	3.51	0.22	15.00	101.0	83.2	242.0	18.0	0.031	40.2	14.2	261	13.2	5.35	133.0
14	11.15	16.84	3.86	0.32	2.96	148.0	74.4	11.7	14.5	0.003	31.9	11.7	254	9.9	1.76	83.4
15	7.08	23.66	2.00	0.37	1.96	72.7	42.2	17.1	9.9	0.004	18.7	7.6	460	7.5	2.47	45.6
16	12.91	12.68	4.34	0.40	3.70	162.0	85.1	14.5	16.7	0.002	39.0	13.5	190	11.8	1.93	86.1
17	11.30	16.34	3.32	0.60	19.30	103.0	70.0	19.7	14.3	0.004	33.3	12.0	380	10.3	1.78	75.7
18	7.15	27.28	2.18	0.27	1.21	88.7	71.2	22.2	8.7	0.003	24.4	7.4	206	6.1	1.12	83.0
19	11.30	16.36	3.62	0.50	17.10	122.0	70.1	21.7	14.8	0.003	36.0	12.3	384	10.9	1.92	82.2
20	8.26	24.40	2.51	0.34	5.61	86.4	56.4	17.2	10.5	0.003	25.4	8.8	479	8.1	1.36	63.8
21	5.06	31.41	1.28	0.26	0.93	43.4	82.6	18.5	6.9	0.003	16.8	5.7	669	5.1	1.29	153.0
22	11.91	14.05	3.04	0.62	24.30	96.7	67.5	19.6	14.5	0.005	35.8	11.6	378	11.1	2.12	70.5
23	8.97	5.38	1.57	1.12	5.70	64.0	53.5	33.9	11.8	0.003	28.6	8.4	122	8.5	1.73	74.9
24	12.40	15.14	3.29	0.52	9.91	109.0	76.5	18.9	16.9	0.005	39.4	13.9	432	11.8	2.44	87.3
25	12.79	14.15	3.36	0.58	9.28	109.0	79.7	20.8	16.8	0.004	40.8	13.5	451	12.0	2.60	82.6
26	17.77	3.82	4.11	0.64	7.23	110.0	103.0	22.9	23.9	0.004	56.9	19.2	109	15.8	3.28	130.0
27	9.53	21.06	2.33	0.58	3.05	76.2	66.1	15.6	12.4	0.003	28.4	10.3	414	9.5	2.13	57.6
28	13.07	11.22	3.18	0.71	5.38	106.0	81.0	20.4	17.0	0.011	41.5	13.5	386	12.0	3.27	102.0
29	8.59	24.08	2.12	0.52	3.04	58.4	54.3	17.6	11.2	0.006	26.9	9.3	415	8.7	1.92	51.0
30	10.18	3.37	2.06	1.09	3.64	67.2	62.4	481.0	13.9	0.043	26.6	10.2	85	9.6	1.96	99.2
31	17.25	3.67	3.58	0.66	16.10	118.0	97.7	21.4	22.1	0.005	52.0	17.1	109	15.4	2.46	111.0
32	11.58	6.26	1.96	1.27	1.71	72.5	70.2	32.2	14.9	0.005	31.6	11.1	103	10.8	2.47	108.0
33	16.82	6.15	3.46	0.60	8.80	109.0	102.0	23.0	22.7	0.004	53.2	18.2	122	15.8	2.60	118.0
34	16.67	4.60	3.52	0.63	11.30	108.0	93.2	21.4	22.0	0.004	46.7	16.7	109	15.0	2.63	117.0
35	13.43	4.73	2.58	1.12	3.17	97.8	83.8	25.2	17.4	0.004	43.3	13.5	104	11.9	2.17	95.0
36	15.86	4.50	3.06	0.84	3.95	91.6	91.7	26.3	20.4	0.004	46.8	15.8	108	14.8	2.76	120.0
37	15.04	12.64	3.28	0.40	2.92	106.0	92.5	29.3	17.8	0.009	39.9	14.2	164	12.3	4.36	179.0
38	13.86	6.40	2.50	0.94	4.55	89.4	112.0	28.3	17.7	0.004	44.2	13.5	105	12.5	2.17	104.0
39	15.71	5.73	3.08	0.88	6.83	99.3	98.6	23.7	20.6	0.004	47.5	16.4	114	14.4	2.44	124.0
40	14.95	6.58	2.92	0.84	5.48	93.4	93.0	27.3	20.0	0.005	50.4	15.6	136	13.9	2.74	130.0

续表 1

编号	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	As	B	Cr	Cu	Ga	Hg	Ni	Sc	Sr	Th	U	V
41	16.62	4.07	3.19	0.70	6.15	106.0	95.1	25.0	22.0	0.004	52.8	17.0	122	15.5	2.67	129.0
42	15.90	6.44	3.22	0.72	5.71	100.0	100.0	24.5	21.2	0.004	51.9	16.9	128	14.2	2.89	146.0
43	16.90	5.15	3.64	0.76	6.83	114.0	109.0	27.0	22.2	0.004	56.4	17.9	128	14.8	2.81	141.0
44	16.80	8.69	3.72	0.52	4.25	101.0	158.0	24.6	20.9	0.005	52.7	17.1	140	14.0	3.09	195.0
45	17.02	6.36	3.70	0.74	11.00	103.0	104.0	22.6	21.2	0.005	52.2	17.1	115	14.4	2.56	152.0
46	16.42	7.21	3.50	0.59	11.40	99.5	103.0	25.4	20.7	0.004	53.0	16.6	114	14.0	2.35	135.0
47	16.46	13.26	2.80	0.80	1.51	61.7	109.0	102.0	13.2	0.010	30.1	10.8	156	10.0	10.30	114.0
48	15.98	5.94	3.25	0.85	8.16	93.9	99.5	27.3	20.5	0.006	54.7	16.7	100	14.0	2.77	135.0
49	16.63	6.65	3.36	0.66	8.52	99.3	100.0	24.7	20.3	0.004	54.8	16.2	118	14.2	2.79	146.0
50	8.21	26.72	1.32	0.72	2.06	39.2	51.4	91.1	9.6	0.008	20.1	8.0	197	6.9	5.54	64.2
51	16.35	6.56	3.34	0.62	12.30	97.0	103.0	25.7	19.5	0.004	51.1	15.6	119	13.6	2.67	128.0
52	14.36	8.99	2.89	0.67	9.64	86.8	90.8	26.1	16.4	0.006	43.1	12.8	124	11.7	2.86	114.0
53	9.93	22.41	1.80	0.73	2.34	46.9	58.4	60.6	11.1	0.011	24.3	8.6	213	8.4	4.00	79.4
54	17.44	5.94	3.68	0.64	10.50	101.0	104.0	22.6	19.0	0.003	49.1	15.0	109	13.4	2.51	161.0
55	13.12	16.20	2.62	0.57	3.39	73.2	79.0	60.7	14.9	0.009	33.4	12.1	250	11.2	4.90	112.0
56	17.51	5.89	3.88	0.68	11.10	100.0	116.0	36.5	22.5	0.006	55.7	18.3	125	14.7	2.73	150.0
57	12.68	15.64	2.36	0.43	2.24	65.9	75.8	49.2	14.3	0.012	31.2	11.6	206	10.3	5.10	106.0
58	16.99	6.10	3.76	0.66	9.39	102.0	112.0	30.0	21.1	0.004	50.4	16.5	146	14.4	3.20	158.0
59	10.67	23.14	2.14	0.53	2.71	57.1	65.0	60.7	12.5	0.006	26.9	10.5	284	8.9	5.18	100.0
60	18.15	5.22	3.90	0.54	11.20	105.0	110.0	17.9	21.3	0.004	52.8	17.3	124	14.8	2.73	152.0
61	15.07	4.41	3.15	0.88	11.20	89.9	108.0	16.9	19.7	0.005	51.6	15.9	95	13.6	2.78	138.0
62	15.06	4.93	3.11	0.88	12.60	93.9	101.0	15.1	18.1	0.004	49.8	14.6	112	13.2	2.98	132.0
63	13.88	9.53	2.94	0.86	8.37	77.3	92.3	10.3	16.8	0.005	42.3	13.1	111	11.8	3.43	119.0

注:主量元素质量分数单位为%;微量元素质量分数单位为10⁻⁶。编号 1—21 为老罗村组;编号 22—45 为麻地山组;编号 46—63 为安宁组。

表 2 研究区中一晚侏罗世钙质泥岩样品碳-氧同位素测试结果

Table 2 Results of carbon and oxygen isotopes of calcareous mudstone samples from Middle-Late Jurassic in the study area

编号	老罗村组		编号	麻地山组		编号	安宁组	
	δ ¹³ C/‰	δ ¹⁸ O/‰		δ ¹³ C/‰	δ ¹⁸ O/‰		δ ¹³ C/‰	δ ¹⁸ O/‰
L-1	-1.32	-5.72	M-1	-1.98	-9.23	A-1	-3.66	-9.78
L-2	-4.19	-10.04	M-2	-2.89	-9.30	A-2	-5.22	-11.72
L-3	0.24	-6.67	M-3	-1.72	-7.45	A-3	-6.24	-11.47
L-4	-2.78	-8.86	M-4	-3.43	-9.52	A-4	-5.75	-11.80
L-5	1.18	-4.62	M-5	-1.61	-4.84	A-5	-2.11	-8.21
L-6	0.23	-4.90	M-6	-5.90	-10.89	A-6	-6.03	-11.71
L-7	-0.71	-6.16	M-7	-4.50	-9.79	A-7	-5.35	-9.70
L-8	-0.79	-5.20	M-8	-3.94	-9.89	A-8	-7.68	-11.02
L-9	-1.46	-6.67	M-9	-3.89	-10.10	A-9	-6.84	-11.25
L-10	-2.77	-8.24	M-10	-3.58	-9.68			

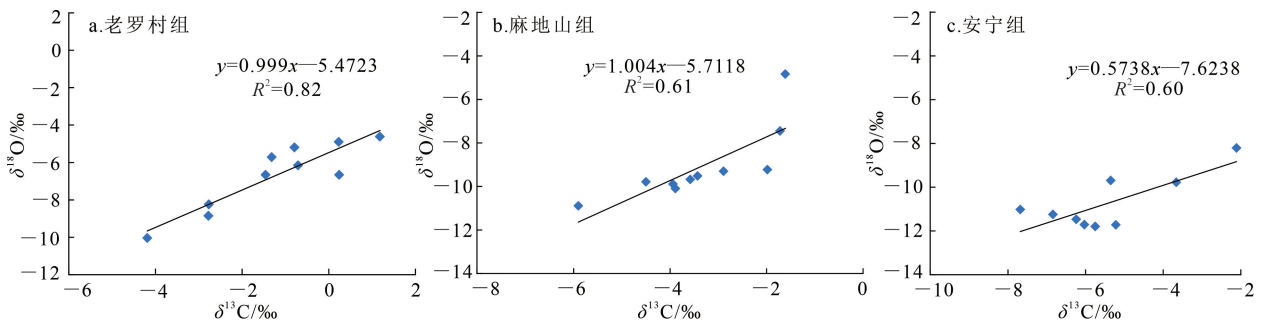
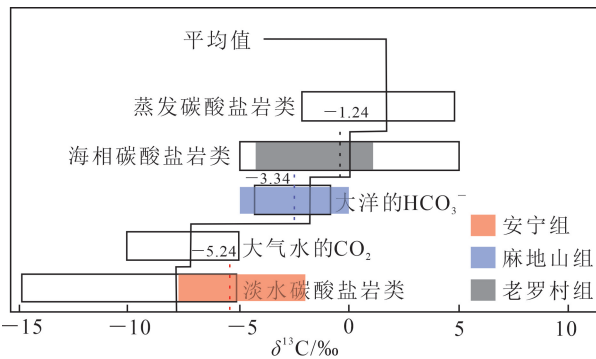


图4 滇中禄丰老文村剖面老罗村组、麻地山组及安宁组碳-氧同位素相关性图

Fig.4 Carbon-oxygen isotope correlation diagram of Laoluocun Formation, Madishan Formation and Anning Formation in Laowen Village section of Lufeng, central Yunnan



底图据文献[14]。

图5 滇中禄丰老文村剖面老罗村组、麻地山组及安宁组碳同位素在碳酸盐岩和有关物质中的分布

Fig.5 Distribution of carbon isotopes in carbonate rocks and related substances of Laoluocun Formation, Madishan Formation and Anning Formation in Laowen Village section of Lufeng, central Yunnan

同时,有学者^[15]通过研究提出了利用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 来区分海相碳酸盐岩和淡水碳酸盐岩的经验公式: $Z = 2.048(\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 50)$, 当 Z 值大于 120‰ 时,被认为是海相碳酸盐岩,小于 120‰ 时,属于淡水环境。通过计算可以看出,老罗村组 Z 值总体大于 120‰ ,均值为 121.1‰ ,表现为咸水环境;麻地山组 Z 值总体小于 120‰ ,但其底部存在小幅度的盐度波动,局部范围内大于 120‰ ,而均值为 115.9‰ ,属于淡水环境;安宁组 Z 值总体小于 120‰ ,均值为 111.7‰ ,表现为淡水环境。

在古盐度的分析中,同样有学者^[16-17]利用地球化学指标来进行判断,包括 Walker“相当硼”、Couch 古盐度、Sr/Ba 值以及 B/Ga 值等。各项指标对古盐度的指示均存在一定的差异,其中以 B/Ga 值表

现为较好的指示意义,二者比值小于 2 为淡水-微咸水环境,2~6 之间为半咸水环境,大于 6 为咸水环境。本次选用微量元素 B/Ga 值(图6)进行分析,老罗村组 B/Ga 值区间为 4.77~10.21,平均值为 6.94,仅底部 2—6 层数值偏小,小于 6,从 6 层开始至 9 层呈阶梯状上升,最高可达 10.21,9 层顶部至 12 层 B/Ga 值又逐渐降低,表明以咸水湖为主;麻地山组 B/Ga 值位于 4.49~6.67 之间,平均值为 5.31,其底部衔接老罗村组顶部的变化趋势,从 13 层至 14 层 B/Ga 值呈逐渐降低的趋势,在 14 层底部由咸水湖转为半咸水湖,15—22 层则表现较为平稳;而安宁组 B/Ga 值位于 4.07~5.32 之间,平均值 4.75,23—40 层均无明显变化,仅在 26—30 层发生小幅度波动,为半咸水湖。

据上所述,禄丰地区中一晚侏罗世由最初的老罗村组开始湖水盐度先是逐步升高,由半咸水湖向咸水湖转变,其盐度在中上部达到峰值,而后开始逐步降低,至麻地山组盐度发生强烈变化,由咸水湖变为半咸水湖,但在麻地山组下部存在局部的盐度升高,自其中下部至安宁组均表现为半咸水环境。

3.3 古温度

封闭咸水湖泊中水体滞留时间相对较长,而且受到蒸发作用的影响,所以根据“纬度效应”计算出的大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值并不能准确代表古封闭湖泊的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。因此,利用碳-氧同位素值计算古温度的经验公式不可取。本次采用微量元素 Sr 质量分数对禄丰地区古温度进行恢复^[18],计算公式为:

$$w(\text{Sr}) = 2578 - 80.8T$$

式中: $w(\text{Sr})$ 为样品中微量元素 Sr 的质量分数; T 为古温度。通过计算得出老罗村组 T 为 $23.6 \sim 30.4\text{ °C}$,平均温度为 28.3 °C ,从 2 层至 12 层温度呈

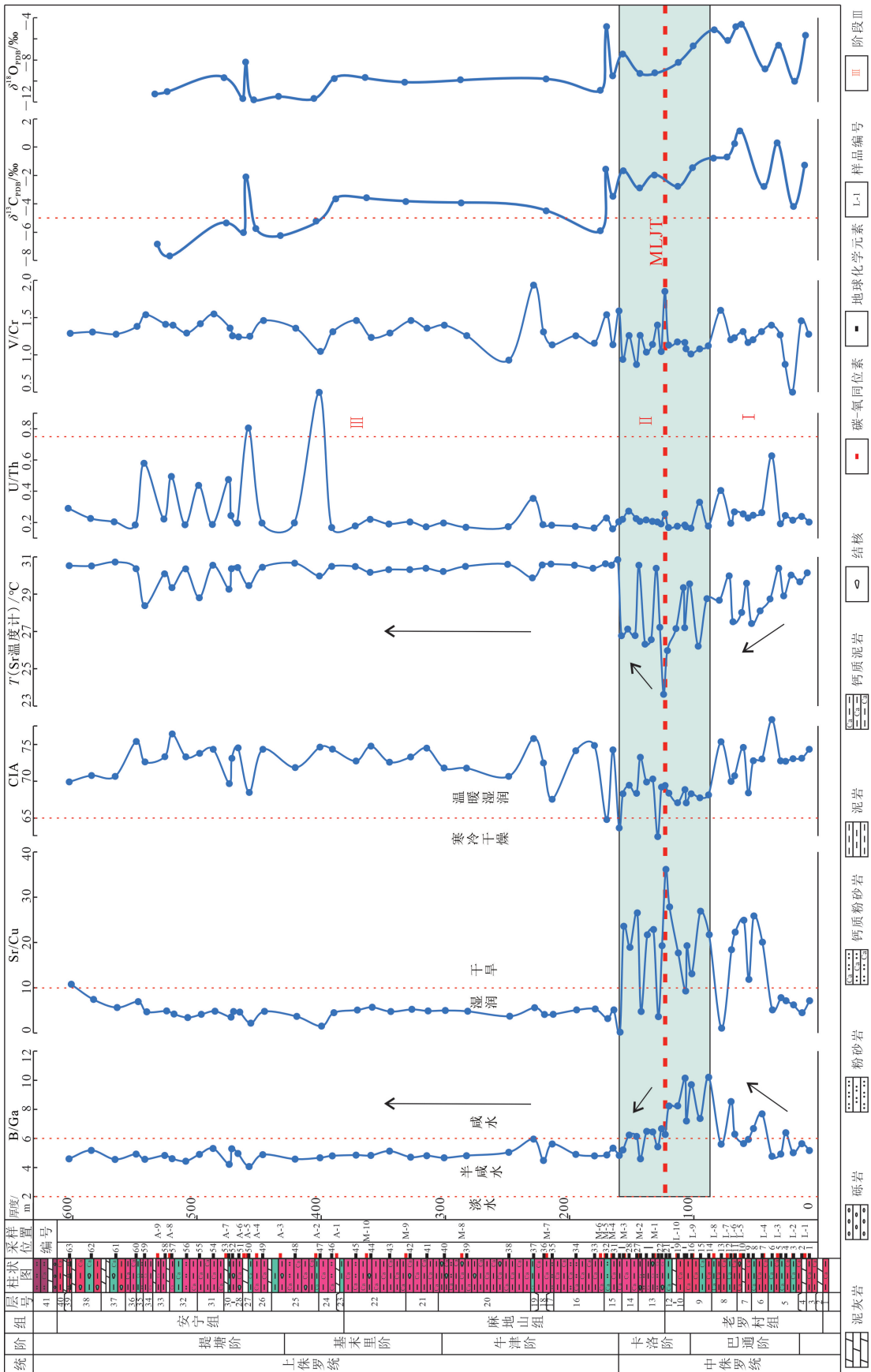


图 6 滇中禄丰老文村剖面中—上侏罗统地球化学综合柱状图
 Fig.6 Geochemical comprehensive histogram of Middle-Upper Jurassic in Laowen Village section of Lufeng, central Yunnan

逐渐降低的趋势,在12层顶部(即老罗村组与麻地山组界线)达到最低,为23.6℃;麻地山组 T 为26.32~30.85℃,平均值为29.49℃,其中麻地山组底部13—14层温度波动剧烈,发生短期的冷热交替之后温度迅速回升,升至30.85℃,幅度达7.22℃,而后温度趋于稳定,在30℃左右浮动;安宁组 T 为28.39~30.73℃,平均值30.07℃,总体保持平稳,在26—36层温度发生小幅度频繁波动,呈锯齿状(图6)。

3.4 氧化还原环境

沉积物中的U、Th、V、Cr、Ni、Co等氧化还原敏感元素对沉积环境的氧化还原性质具有较好的指示意义,通过这些元素在沉积物岩中的质量分数或比值可以重建氧化还原状态^[19]。其中U/Th值和V/Cr值作为可靠指标被广泛应用于古水体氧化还原环境的判别中。在氧化环境中,U元素常以 U^{6+} 溶解于水体中,从而导致其在沉积物中亏损,Th则以 Th^{4+} 价态不溶于水,V元素在缺氧还原环境下易在沉积物中富集。据前人研究,U/Th值大于1.25或V/Cr值大于4.25,指示水体为缺氧还原环境,U/Th值位于0.75~1.25之间或V/Cr值位于2.00~4.24之间,指示贫氧环境,U/Th值小于0.75或V/Cr值小于2.00则指示氧化环境^[20-22]。

根据数据计算结果,老罗村组和麻地山组U/Th值均远小于0.75,老罗村组U/Th值为0.17~0.63,平均值为0.25,总体保持平稳,其中在5层顶部、8层和9层中部发生小幅度的氧化环境减弱;麻地山组U/Th值为0.16~0.35,平均值为0.21,保持更为稳定的氧化环境;安宁组U/Th值为0.18~1.03,平均值为0.34,安宁组虽然在24—36层发生了多频次环境波动,但幅度不大,仅在24层和27层达到弱还原环境状态,但总体均表现为氧化环境(图6)。而3个组的V/Cr值均小于2(图6),同样指示为氧化环境,其数值曲线与U/Th值具有较为一致的变化特征。

3.5 干湿环境

3.5.1 化学蚀变指数(I_{CA})

化学蚀变指数作为气候敏感性指标被广泛应用于古气候变化的研究中,常用于反映沉积物化学风化程度与温湿度之间的关系,而陆地化学风化作用则主要受控于温度和湿度,当气候由干冷向暖湿转变时,化学风化作用显著增强。前人^[23-25]通过研究给出了定量分析化学蚀变作用强度的计算公式:

$$I_{CA} = x(Al_2O_3) / (x(Al_2O_3) +$$

$$x(CaO^*) + x(Na_2O) + x(K_2O)) \times 100\%$$

式中: x 为摩尔分数; $x(CaO^*)$ 表示硅酸盐中CaO的摩尔分数。对于 $x(CaO^*)$ 的计算和矫正,一般采用McLennan等^[23]提出的公式: $x(CaO^*) = x(CaO) - (10/3x(P_2O_5))$,当矫正后的 $x(CaO) < x(Na_2O)$,采用 $x(CaO)$ 作为 $x(CaO^*)$,反之则采用 $x(Na_2O)$ 作为 $x(CaO^*)$ 。当沉积物经历过强烈的化学风化作用,其 I_{CA} 值位于80~100之间,代表炎热潮湿的热带气候环境;当经历中等风化过程,其 I_{CA} 值位于65~80之间,代表温暖湿润的气候环境;当沉积物经历了较弱的化学风化过程, I_{CA} 值位于50~65之间时,指示寒冷干燥的气候环境。

通过计算(图6)可以看出:老罗村组 I_{CA} 值位于67.0~78.0之间,平均值为71.0,2—5层无明显波动,从5层顶部开始突然上升至78.0,而后在6—8层逐渐降低,9—12层则趋于稳定;麻地山组 I_{CA} 值位于62.5~75.5之间,平均值为70.6,其中在13—18层波动剧烈,甚至于13层底部和14层顶部小于65,达到相对寒冷干燥环境,19—22层呈锯齿状小幅度波动;安宁组 I_{CA} 值位于68.4~75.1之间,平均值为72.6,总体呈锯齿状小幅度波动,为温暖湿润型。由于陆相地层 I_{CA} 指标主要由温度和湿度两个因素控制,对于温度和湿度在其中各自发挥的作用需要辩证看待,侏罗纪为温室地球气候环境,禄丰地区侏罗纪中一晚期处于中低纬度地区^[25],且本次研究该时期气温均远大于10℃,具有明显波动,故湿度变化为影响 I_{CA} 指标的主要因素。老罗村组自下而上呈锯齿状逐渐减小的趋势,表明气候整体属于相对湿润型,但逐渐向干燥型过渡,在老罗村组与麻地山组界线处发生突变,而后气温迅速回升,在麻地山组底部发生多次干燥与湿润的气候交替,麻地山组中下部至安宁组结束,气候总体较为平稳,属于湿润型。由于 I_{CA} 值反映的是源区化学风化强度,受沉积物搬运时间影响,反映气候条件具有一定的滞后性^[26],因此在15—18层还存在一定的波动性。

3.5.2 Sr/Cu值

Lerman^[27]建立的Sr/Cu值与沉积时期古气候的对应关系指出,当Sr/Cu值介于1~10之间,表明成岩气候湿润,大于10则为相对干旱的气候。通过计算分析,Sr/Cu值与 I_{CA} 指标演化趋势具有明显的一致性(图6)。中侏罗统老罗村组Sr/Cu值为1.08~36.16,平均值为15.92,其中2—5层无明显

波动, Sr/Cu 值保持在 4.50~7.82 之间, 为湿润气候, 6 层底部开始发生突变, Sr/Cu 值急剧升高, 6—12 层波动剧烈, 呈逐渐升高的趋势, 最高达 36.16, 总体气候呈干湿交替, 自下而上 Sr/Cu 值逐渐升高, 表明气候趋于干旱; 麻地山组 Sr/Cu 值为 0.18~26.54, 平均值为 0.64, 进入麻地山组气候再次发生突变, 由干旱突然转为湿润气候, 并在 13—14 层发生较为强烈的干湿交替, 15—22 层则保持较为稳定的湿润气候; 安宁组 Sr/Cu 值为 1.53~10.78, 平均值为 4.81, 该组在 23—32 层保持较为稳定的湿润气候, 期间发生极小幅度的波动, 33 层开始逐渐向干旱气候转变, 并在 39 层达到干旱状态。

4 讨论

4.1 川街盆地气候变化特征

根据上述测试结果的分析可以看出, Sr 温度计和 I_{Ca} 值很好地反映了滇中川街地区中一晚侏罗世气温变化特征。中侏罗世开始气温呈逐渐下降的趋势, 在中侏罗世卡洛中期达到最低, 随之而来的环境也变得异常干燥, 湖泊盐度升高, 由半咸水湖转为咸水湖, 长时间的降温之后在卡洛晚期温度骤然回升, 并具有较强烈的气温波动, 同时伴随着干湿交替, 但如此快速变化的气候环境并未持续太长时间。进入晚侏罗世, 气温恢复到较高的水平, 并一直以较为稳定的状态持续到晚侏罗世晚期, 期间环境也属于温暖湿润型, 湖泊状态为稳定的半咸水湖。据此可以将川街盆地中一晚侏罗世气候演化分为 3 个阶段。

I 阶段(巴通期—卡洛夫期早期): 为老罗村组沉积期, 湖泊封闭性好, 为咸水湖, 且水体盐度逐渐升高, U/Th 值位于 0.19~0.62 之间, 平均值为 0.28, 小于 0.75, V/Cr 值位于 0.50~1.60 之间, 平均值为 1.21, 小于 2.00, 氧化还原环境虽然呈小幅度的波动, 但总体表现为较强的氧化环境, 气温呈降低趋势, 并在其顶部达到最低, 气候则为干旱型。该沉积期整体表现为气候由相对湿润向干燥的转变, 并且在此期间伴随着频繁的干湿交替。由于温度的降低以及气候持续干燥, 化学风化蚀变减弱, 碳酸盐岩发育期无良好的陆源碎屑供给, 加之湖泊水体供给不足, 导致蒸发量远大于供给量, 从而导致湖泊盐度持续增高。

II 阶段(卡洛夫期中一晚): 为麻地山组底部沉积期, 该时期湖泊封闭性较差, 湖泊为咸水湖—半咸水湖, 化学风化蚀变相对较弱, U/Th 值位于

0.16~0.33 之间, 平均值为 0.21, 小于 0.75, V/Cr 值位于 0.87~1.85 之间, 平均值为 1.18, 小于 2.00, 氧化还原环境无明显变化, 显示为较强的氧化环境。此阶段气候波动极为频繁, 干湿交替明显, 随着气温的快速回升, 气候迅速回暖, 由干燥转为湿润型。暖湿气候下, 随着降水量的增加, 湖泊水体供给量高于蒸发量, 但是由于气候波动频繁, 湖泊在咸水与半咸水之间转换。

III 阶段(牛津期—提塘期): 为麻地山组中下部至安宁组顶部沉积期, 湖泊封闭性进一步减弱, 盐度降低, 为半咸水湖, 化学风化蚀变进一步加强, 气候更加湿润, 氧化还原环境却发生较为强烈的波动, 有间断的还原环境, 表明该时期湖泊存在短期的水体加深。该阶段气候整体趋于稳定, 总体保持相对温暖湿润的环境。

侏罗纪是地质历史上典型的温室时期, 高体积分数的 CO_2 是现今体积分数的数倍之高, 气温更是高于现今 5~10 °C^[25], 许多学者认为这一阶段全球缺乏大规模的冰川作用。即使如此, 该时期同样发生过多次剧烈的气候波动事件, 前人^[28] 研究认为, 中侏罗世晚期, 即巴通期开始全球发生过一次重要的气候转变, 气候逐渐升高并趋于干旱化, 在中国北方表现为由前期的温暖潮湿型向干旱炎热型转变, 南方则进一步干热化。根据邓胜徽等^[28] 对中国侏罗纪古气候的分区, 禄丰地区中侏罗世晚期仍属于热带—亚热带干旱气候区, 气候以炎热干旱为主。但是随着近年来稳定同位素等的研究, 有越来越多的证据指出, 在中侏罗世晚期存在一次全球性的降温事件。来自中—低纬度地区的多个氧同位素研究显示, 进入中侏罗世, 气温降低, 转为相对寒冷阶段, 晚侏罗世气温有所回升, 进入相对温暖阶段, 特别是在中一晚侏罗世卡洛夫期—牛津期界线附近, 气温骤降, 温度达到最低, 该事件被称为中一晚侏罗世过渡期寒冷事件(即 MLJT 事件)。周敏等^[25] 通过对四川盆地侏罗系红层中的 CO_2 体积分数研究也指出, 中侏罗世巴通期—卡洛夫期 CO_2 体积分数均值为 760×10^{-6} , 是侏罗纪 CO_2 体积分数最低的时期之一(CO_2 体积分数高低变化与海洋表层温度的升降大体一致)。结合本次地球化学数据分析的结果, 在老罗村组与麻地山组界线处, 即中侏罗世卡洛夫期识别出一次降温事件。该事件对应着中侏罗世过渡寒冷事件, 中侏罗世晚期由于地域因素的差异, 不同地区气候演变可能具有差异性。在四川、云南等地

的陆相红层中,中侏罗世晚期气候依然存在阶段性的温凉气候,其变化特征与全球性的气温降低较为吻合。这一阶段的存在表明,侏罗纪温室地球气候并非“一热到底”,而是存在气候的快速波动以及短暂的降温事件,这一阶段不仅在海相地层中有明显的记录,陆相地层中同样存在很好的对应性。

4.2 气候变化对生物生存环境的影响

根据前人^[29]在禄丰地区生物地层方面的研究,中侏罗统老罗村组中化石种类较为丰富,主要类型有脊椎动物、鱼鳞、介形虫、双壳类及轮藻。

杨钟健^[30]在滇中地区发现中国的第一类弓鲛鱼类化石——后甸弓鲛,主要分布于中侏罗统老罗村组,适合生活于内陆湖盆较为广阔的水体。后甸弓鲛类软骨鱼的发现,表明当时的川街盆地和楚雄大盆地之间在某一阶段是存在水体相互连通的^[31]。介形虫类 *Darwinula sarytirmenensis*-*D. impudica*-*D. lufengensis* 组合带在老罗村组的紫红色粉砂质泥岩及灰岩中广泛发育,化石数量极为丰富,且属性单一,均为 *Darwinula*,属于浅水型半咸水环境的厚壳型介形类。轮藻类则以 *Aclistochara abshirira*-*A. maansharnensis*-*A. karierica* 组合为特征,其中以 *Aclistochara* 属占绝对优势,常见于清澈、安静的浅水环境^[29],同时大量出露的分散鱼鳞化石,表明其为搬运的结果。

结合本次对中一晚侏罗世气候演变特征的研究,中侏罗世早期气候还处于相对湿润的状态,随着暴雨期河水的上涨,汇入湖盆的水量增大,连通了川街盆地与楚雄大盆地之间的通道,使得大量生物可以在两方水体之间生存,一部分生物从楚雄盆地流入川街盆地。到中侏罗世中、晚期,随着气候的急剧变化,陆相环境已经变得异常干旱,持续高强度的水体蒸发导致湖平面下降,川街盆地水体面积减少,湖盆之间不再连通,同时也造成了湖水盐度的快速升高。由于生存环境的急剧变化,原有的中侏罗世陆相湖泊面貌的后甸弓鲛类、大部分介形虫、双壳类及轮藻已无法适应新的生活环境,导致生物集群的快速死亡,随着遗体的腐烂,加之暴雨期河流的搬运、沉积和快速埋藏,最终形成了川街盆地如今的生物埋藏特征。到晚侏罗世早期,仅存在少量的叶肢介及介形虫类。

5 结论

1)川街盆地中一晚侏罗世气候变化经历了3个

阶段:阶段I(降温期),湖泊为封闭性较好、盐度逐渐升高的咸水湖,该时期气候由相对湿润转为干燥,气温总体较高,从早期到晚期表现为温度逐渐降低的趋势;阶段II(波动期),湖泊封闭性减弱,为咸水-半咸水湖,该阶段气候由干燥向相对湿润气候转变,温度回升,但气候波动剧烈,干湿交替频繁;阶段III(稳定期),湖泊封闭性进一步减弱,为半咸水湖泊,气候总体趋于稳定,为湿润型气候。

2)禄丰地区川街盆地陆相红层麻地山组下部识别出中一晚侏罗世过渡期寒冷事件(即MLJT事件),为中生代温室地球气候环境研究和西南地区陆相红层的对比研究提供了重要参考。

3)中侏罗世早中期相对湿润的气候带来丰沛的水量,连通了楚雄盆地与川街盆地;晚期极度干旱的环境致使生物快速死亡,生物骨骼等随着暴雨期河流的搬运快速埋藏,形成了如今川街盆地的生物埋藏特征。

参考文献(References):

- [1] 谭富文,王剑,王小龙,等.羌塘盆地雁石坪地区中一晚侏罗世碳、氧同位素特征与沉积环境分析[J].地球学报,2004,25(2):119-126.
Tan Fuwen, Wang Jian, Wang Xiaolong, et al. Analysis of Carbon and Oxygen Isotope Composition and Sedimentary Environment of the Yanshiping Area of the Qiangtang Basin in Middle-Late Jurassic[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(2): 119-126.
- [2] 曹珂,李祥辉,王成善,等.四川广元地区中侏罗世一早白垩世粘土矿物与古气候[J].矿物岩石,2010,30(1):41-46.
Cao Ke, Li Xianghui, Wang Chengshan, et al. Clay Minerals of the Middle Jurassic-Lower Cretaceous in the Guangyuan Area, Northern Sichuan: Implications to Paleoclimate[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2010, 30(1): 41-46.
- [3] 梁斌,王全伟,阚泽忠.四川盆地中侏罗统沙溪庙组钙质结核的碳、氧同位素特征[J].矿物岩石,2007,27(2):54-58.
Liang Bin, Wang Quanwei, Kan Zezhong. Carbon and Oxygen Isotopic Compositions of Carbonate Nodule in the Shaximiao Formation of the Middle Jurassic, Sichuan Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2007, 27(2): 54-58.
- [4] 梁文君,肖传桃,肖凯,等.藏北安多晚侏罗世古环境、古气候与地球化学元素关系研究[J].中国地质,2015,

- 42(4):1079-1091.
- Liang Wenjun, Xiao Chuantao, Xiao Kai, et al. The Relationship of Late Jurassic Paleoenvironment and Paleoclimate with Geochemical Elements in Amdo Country of Northern Tibet [J]. *Geology in China*, 2015, 42(4):1079-1091.
- [5] 陈晓慧, 曾建理, 张廷山, 等. 川东北地区中侏罗世新田沟期古气候波动的地球化学响应[J]. *地质学报*, 2019, 93(12):3223-3238.
- Chen Xiaohui, Zeng Jianli, Zhang Tingshan, et al. Geochemical Response to Paleoclimate Fluctuation During Xintiangou Period (Middle Jurassic), Northeastern Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(12):3223-3238.
- [6] 方晓思, 赵喜进, 卢立伍, 等. 云南首次发现晚侏罗世马门溪龙化石[J]. *地质通报*, 2004, 23(9/10):1005-1011.
- Fang Xiaosi, Zhao Xijin, Lu Liwu, et al. Discovery of Late Jurassic Mamenchisaurus in Yunnan, Southwestern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9/10):1005-1011.
- [7] 卢立伍, 靳悦高, 方晓思. 云南禄丰中侏罗世弓鲛(软骨鱼类)化石新材料[J]. *地质通报*, 2005, 24(2):145-148.
- Lu Liwu, Jin Yuegao, Fang Xiaosi. A Revision of Middle Jurassic *Hybodus Houtienensis* Young (Chondrichthyes: Hybodontidae) from Yunnan [J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(2):145-148.
- [8] Young G C. On Two New Fossil Fishes from Southwestern China[J]. *Bull Geol Soc China*, 1941, 21:91-96.
- [9] 董枝明. 中国恐龙研究的新进展[J]. *化石*, 2008(3):23-24.
- Dong Zhiming. New Progress in the Study of Dinosaurs in China[J]. *Fossil*, 2008(3):23-24.
- [10] 王国付, 潘世刚, 李俊, 等. 云南楚雄盆地东南缘安龙堡下侏罗统含恐龙化石地层的时代厘定[J]. *地层学杂志*, 2019, 43(4):432-441.
- Wang Guofu, Pan Shigang, Li Jun, et al. Revision of the Lower Jurassic Dinosaur-Bearing Horizons in Anlongbao of Southeastern Chuxiong Basin, Yunnan Province, China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2019, 43(4):432-441.
- [11] 曾文涛, 刘桂春, 马进华, 等. 楚雄盆地西缘下侏罗统冯家河组震积岩特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 2018, 37(11):1997-2006.
- Zeng Wentao, Liu Guichun, Ma Jinhua, et al. Characteristics and Geological Significance of Seismites in the Lower Jurassic Fengjiahe Formation in Western Chuxiong Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(11):1997-2006.
- [12] 张桓, 陈亚军, 伍宏美, 等. 火山喷发间歇期沉积岩层古沉积环境的地球化学示踪与判别[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(5):1417-1436.
- Zhang Huan, Chen Yajun, Wu Hongmei, et al. Geochemical Tracing and Discrimination of Paleosedimentary Environment of Sedimentary Rock Intercalation During Volcanic Eruption Intervals[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(5):1417-1436.
- [13] Bandyopadhyay S, Gillette D D, Ray S, et al. Osteology of *Barapasaurus Tagorei* (Dinosauria: Sauropoda) from the Early Jurassic of India [J]. *Palaeontology*, 2010, 53(3):533-569.
- [14] 沈立建, 刘成林, 王立成. 云南兰坪盆地古近系云龙组上段沉积环境研究: 来自碳、氧同位素的证据[J]. *地球学报*, 2016, 37(3):301-306.
- Shen Lijian, Liu Chenglin, Wang Licheng. A Study of the Sedimentary Environment of the Upper Member of the Paleogene Yunlong Formation in Lanping Basin, Yunnan Province: Evidence from Carbon and Oxygen Stable Isotopes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(3):301-306.
- [15] Keith M L, Weber J N. Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Selected Limestones and Fossils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(10/11):1787-1816.
- [16] 张秀莲. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. *沉积学报*, 1985, 3(4):17-30.
- Zhang Xiulian. Relationship Between Carbon and Oxygen Stable Isotope in Carbonate Rocks and Paleosalinity and Paleotemperature of Seawater[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(4):17-30.
- [17] 孙立广, 谢周清, 赵俊琳. 南极阿德雷岛湖泊沉积物 Sr/Ba 与 B/Ga 比值特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(4):43-46.
- Sun Liguang, Xie Zhouqing, Zhao Junlin. The Characteristics of Sr/Ba and B/Ga Ratios in Lake Sediments on the Ardley Peninsula, Maritime Antarctic [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(4):43-46.
- [18] 王换玲. 鄂尔多斯盆地马家沟组碳酸盐岩碳氧同位素特征及古环境意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.

- Wang Huanling. Carbon and Oxygen Isotopic Characteristics and Palaeoenvironmental Significance of Majiagou Formation Carbonate Rocks, Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [19] Meng Q T, Liu Z J, Bruch A A, et al. Palaeoclimatic Evolution During Eocene and Its Influence on Oil Shale Mineralization, Fushun Basin, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 45: 95 - 105.
- [20] 胡俊杰, 马寅生, 王宗秀, 等. 地球化学记录揭示的柴达木盆地北缘地区中—晚侏罗世古环境与古气候 [J]. *古地理学报*, 2017, 19(3): 480 - 490.
- Hu Junjie, Ma Yinsheng, Wang Zongxiu, et al. Palaeoenvironment and Palaeoclimate of the Middle to Late Jurassic Revealed by Geochemical Records in Northern Margin of Qaidam Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(3): 480 - 490.
- [21] Wang Zhongwei, Fu Xiugen, Feng Xinglei, et al. Geochemical Features of the Black Shales from the Wuyu Basin, Southern Tibet: Implications for Palaeoenvironment and Palaeoclimate [J]. *Geological Journal*, 2017, 52: 282 - 297.
- [22] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship Between Inferred Redox Potential of the Depositional Environment and Geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA [J]. *Chemical Geology*, 1994, 99 (1/2/3): 65 - 82.
- [23] McLennan S M. Weathering and Global Denudation [J]. *Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295 - 303.
- [24] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites [J]. *Nature*, 1982, 299: 715 - 717.
- [25] 周敏, 李祥辉, 王旌羽. 四川盆地东北中—晚侏罗世沉积环境与古气候 [J]. *沉积学报*, 2024, 42(3): 1003 - 1015.
- Zhou Min, Li Xianghui, Wang Jingyu. Sedimentary Environments and Palaeoclimate of the Middle-Upper Jurassic in the Northeastern Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3): 1003 - 1015.
- [26] 李明龙, 陈林, 田景春, 等. 鄂西走马地区南华纪古城期—南沱早期古气候和古氧相演化: 来自细碎屑岩元素地球化学的证据 [J]. *地质学报*, 2019, 93(9): 2150 - 2170.
- Li Minglong, Chen Lin, Tian Jingchun, et al. Palaeoclimate and Paleo-Oxygen Evolution During the Gucheng Period-Early Nantuo Period of Nanhua System in the Zouma Area, West Hubei: Evidence from Elemental Geochemistry of Fine Clastic Rocks [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(9): 2150 - 2170.
- [27] Lerman A. Lakes Chemistry and Geology Physics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1 - 318.
- [28] 邓胜徽, 卢远征, 赵怡, 等. 中国侏罗纪古气候分区与演变 [J]. *地学前缘*, 2017, 24(1): 106 - 142.
- Deng Shenghui, Lu Yuanzheng, Zhao Yi, et al. The Jurassic Palaeoclimate Regionalization and Evolution of China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(1): 106 - 142.
- [29] 方晓思, 李佩贤, 张志军, 等. 滇中侏罗纪红层 [M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1 - 111.
- Fang Xiaosi, Li Peixian, Zhang Zhijun, et al. Jurassic Red Beds in Central Yunnan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1 - 111.
- [30] 杨钟健. 中国古生物志: 禄丰蜥龙动物群: 新丙种 [M]. 北京: 科学出版社, 1951: 1 - 94.
- Yang Zhongjian. Paleontology of China: Lufeng Sauropod Fauna: New Species C [M]. Beijing: Science Press, 1951: 1 - 94.
- [31] 孙柏东, 王伟, 刘军平, 等. 滇中川街盆地中侏罗世弓鲛(软骨鱼类)化石新材料 [J]. *地质通报*, 2018, 37(11): 1991 - 1996.
- Sun Baidong, Wang Wei, Liu Junping, et al. New Fossil Materials of Hybodus (Chondrichthyes) in the Middle Jurassic Found in Chuanjie Basin of Central Yunnan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(11): 1991 - 1996.