www.
geojournals.cn/georev

地球化学揭示早—中侏罗世陆相地层气候环境变化特征

——以滇中川街盆地老文村剖面为例

张耀堂[1,2),]王万能[1,2),]赵见波[1,2),]袁永盛[1,2),]李锁明[1,2),]
张宏辉[1,2),]郑洪福[1,2),]李金旺[1,2)]

1)中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心,昆明,650100;
2)自然资源部自然生态系统碳汇工程技术创新中心,昆明,650100

内容提要:侏罗纪温室气候是中生代以来重要的气候变暖事件,全球关于该事件的研究主要集中在海相地层中,关于陆相地层的研究较少,滇中禄丰川街盆地沉积了完整的侏罗纪地层,为研究侏罗纪温室地球气候环境提供了良好的载体。本次工作通过对川街盆地早—中侏罗世陆相红层的岩石地层、微量元素地球化学研究认为,滇中地区早侏罗世早期主要为高温、湿润的气候环境,早侏罗世晚期气候波动剧烈且频繁,湖泊盐度急剧上升,气温缓慢下降,在即将进入中侏罗世时气温骤然上升,水体盐度快速降低,发生"T—OAE事件",之后则保持较为稳定的高温、干燥的气候环境。通过对滇中侏罗纪恐龙埋藏层位的研究发现,早侏罗世晚期气候环境的突变层位与该层位位置相当,沉积特征及地球化学特征表明恐龙的集群性埋藏与该事件有着密不可分的关系。

关键词:川街盆地;禄丰组;川街组;古环境

从中国人第一个自主发表并研究的恐龙禄丰龙到大规模群体埋藏的川街龙,禄丰地区的恐龙研究热度一直很高,世界恐龙谷以往研究侧重于恐龙的形态学和系统分类学,但对恐龙的死亡和埋藏原因较少且缺少依据。近年来,随着科学研究的不断深入,表明全球气候变暖的趋势一直在持续,而目前的气候模拟对真实气候的运行机制任不够系统全面,因此,研究地质历史时期类似的变暖事件及其对生态环境的影响显得尤为重要(胡修棉等,2020),侏罗纪是典型的温室气候期,特别是早侏罗世Toarcian期大洋缺氧事件作为中生代一次重要的环境演变事件,同时,也是显生宙以来最大的两次全球极热事件之一,该事件虽然历时不到一百万年,但对气候环境及生态系统造成了巨大影响,而目前关于早中侏罗世气候的研究主要集中在海相地层中,关于陆相地层的研究报道较少。滇中禄丰川街盆地沉积了完整的早侏罗世—中侏罗世陆相红层,为研究该时期气候环境演化特征提供了良好的条件,同时由于独特的地理环境,禄丰地区早—中侏罗世地层中埋藏了大量恐龙化石,通过研究其埋藏层位的岩石地层沉积特征及气候环境,对探索恐龙生存环境及埋藏学具有重要意义。研究表明,气候对恐龙的生物多样性、空间地理分布以及生态结构等均有重要影响,更干旱的气候条件下往往保存有更大比例的大体型类群,但目前对于恐龙化石埋藏学方面的研究还不够深入,特别是利用恐龙化石围岩探讨其埋藏的沉积环境(Domingo et al., 2009;Noto et al., 2010;申欢等,2021)。沉积岩元素地球化学分析作为近年来古气候和古环境研究中十分成熟和普遍的方法手段,是十分有必要的(邵磊等,2000)。水体沉积物中的微量、稀土元素不仅与本身的化学性质有关,同时受沉积介质物理化学条件及古气候条件的影响,因此,利用沉积物中的微量、稀土元素不仅可以指示古沉积环境的氧化还原状态,也可以反映古环境、古气候的演化(张天福等,2016;程先钰等,2022)。

笔者等通过对滇中禄丰川街盆地早—中侏罗世陆相红层的岩石地层及元素地球化学特征的研究,

注:本文为中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20220987)的成果。
收稿日期:2023-12-20;改回日期:2024-04-09;网络首发:2024-06-20;责任编辑:李明、章雨旭。Doi:10.16509/j.georeview.2024.06.052
作者简介:张耀堂,男,1991年生,工程师,主要从事区域地质矿产调查;Email:1585413443@qq.com。通讯作者:王万能,男,1995年生,工程师,主要从事区域地质调查工作;Email:1922637474@qq.com。

重建该时期古气候、古环境,为早—中侏罗世陆相地层的研究提供重要参考。

1　地质概况及地层划分

研究区位于云南省禄丰市川街地区,地理位置上属于川街盆地,为一近等轴状向斜盆地,地层由四面向中间倾斜,面积约 75 km^2,向北与禄丰盆地相邻,二者地层层序与沉积特征大体一致,均属于昆明地层小区,向西沿一平浪—新平一线与楚雄盆地相隔,分属不同的地层小区(图 1a)。盆地内出露的地层自下而上主要为上三叠统、侏罗系、白垩系及第四系。

其中上三叠统仅在盆地西侧绿汁江断裂附近少量出露,为湖相碎屑岩建造;侏罗系在盆地边缘广泛发育,为厚层的紫红色、灰绿色陆相碎屑岩、碳酸盐岩建造;白垩系主要分布于盆地中央的向斜核部,为湖相棕红色—紫红色砂砾岩夹泥岩和少量泥灰岩建造。此次工作主要集中在下侏罗统禄丰组和中侏罗统川街组。禄丰组以产出禄丰动物群为特征,主要分布在川街盆地西部和北部区域(图 1b),早期以古脚类恐龙为主,后期出现少量真正的蜥脚类恐龙,川街组则以蜥脚类川街龙作为川街龙动物群的代表,仅在盆地北部少量分布(方晓思等,2008)。

本次工作测制剖面位于云南省禄丰市恐龙山镇,剖面位置(剖面起点 E:102°6′3.65″,N:24°56′27.63″,Z:1479.50,终点 102°5′40.35″,N:24°56′31.89″,Z:1521.30),出露地层自下而上依次为下侏罗统禄丰组一段、禄丰组二段、中侏罗统川街组一段、川街组二段及老罗村组(图 2),各组段具体岩性如下:

中侏罗统老罗村组(J_2l):

69. 灰紫色、灰白色薄中层状泥灰岩,可见角砾化

————————整合接触————————

中侏罗统川街组二段(J_2c^2):

68. 底部为厚约 1.8 m 的紫红色薄层状粉砂岩与泥岩互层,比例 1∶1,上部为厚层状泥岩。底部发育少量砂纹层理,近垂直层面的潜穴,含少量的钙质结核　23.3 m
67. 紫红色块状泥岩　2.4 m
66. 底部为薄层状粉砂质泥岩,发育水平层理,上部为中薄层状泥岩。顶部可见大量钙质结核　3.3 m
65. 底部为厚 80 cm 的紫红色粉砂岩,上部为厚层块状泥岩。可见泥裂　4.9 m
64. 暗紫、紫红色厚层块状钙质粉砂岩与紫红色厚层状泥岩互层,比例 2∶1~1∶3,底部粉砂岩中可见砂纹层理　20.9 m

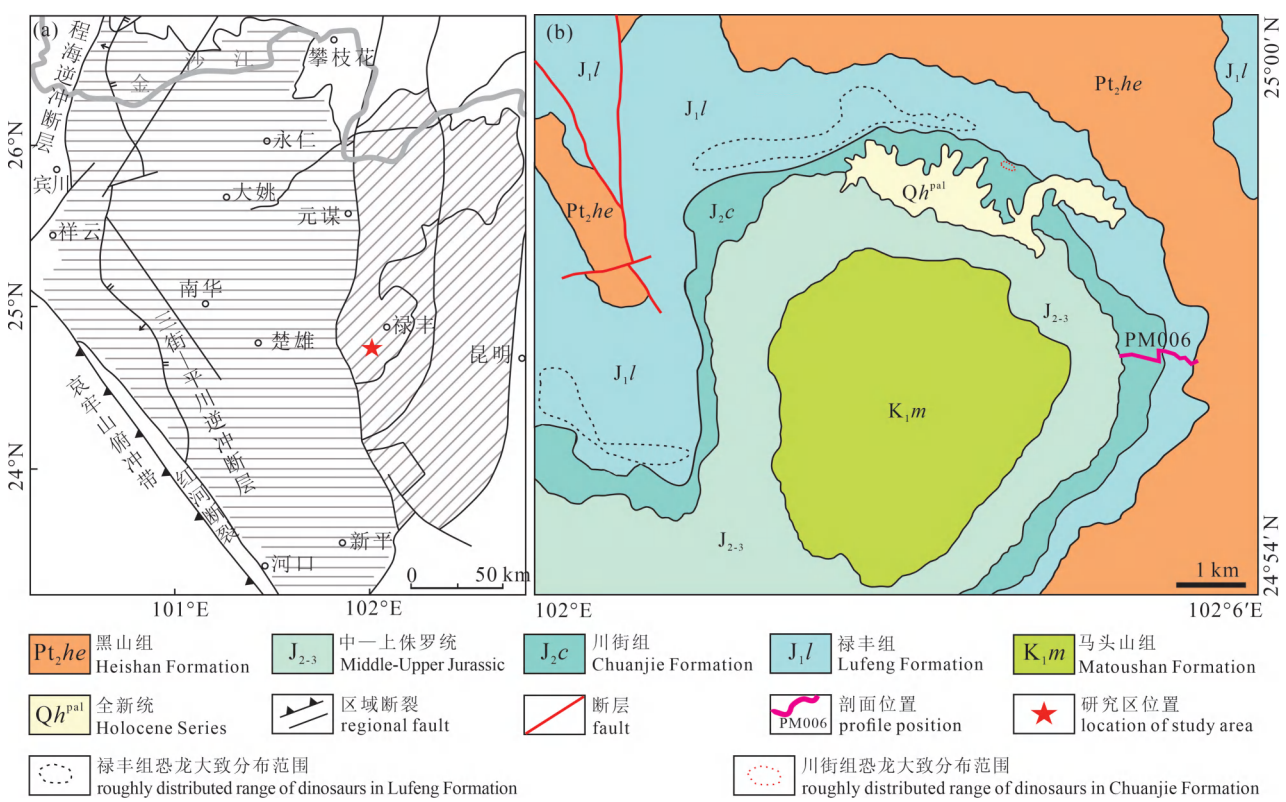

图 1 云南禄丰川街盆地大地构造位置及恐龙分布图

Fig. 1 Geotectonic location and dinosaur distribution map of the Chuanjie Basin in Lufeng, Yunnan Province

63. 紫灰色、灰绿色、暗紫色不等厚钙质泥岩、泥岩,底部为 110 cm 的紫灰色厚层状钙质泥岩,其上为 5~8 cm 的灰绿色薄层状钙质泥岩,其上为厚 60 cm 的暗紫色泥岩 1.1 m
62. 砖红色块状泥岩,向上出现中薄层状钙质粉砂岩。泥岩层理不发育,可见小型钙质泥岩脉穿插,上部出现砂纹层理,羽状交错层理,水平层理 3.9 m
61. 灰紫色厚层状钙质泥岩 2.0 m
60. 由两个向上粒度变细的旋回组成,每个旋回下部为紫红色薄—中厚层状钙质粉砂岩与同色厚层—块状泥岩互层,比例 2∶1~1∶5,向上泥岩比例增加,为一个水深变深的旋回。底部发育交错层理,砂纹层理,可见透镜状含砾泥岩 18.5 m
59. 紫红色厚层块状钙质泥岩夹同色钙质粉砂岩,比例 8∶1。向上泥岩比例增加,至顶部泥岩中含钙质结核 8.9 m
58. 紫红色中厚层状泥岩夹灰绿色薄中层状钙质粉砂岩,比例 8∶1,向上泥岩比例增加,粉砂岩比例减少 1.0 m
57. 灰绿色厚层状钙质粉砂岩与紫红色薄层状泥岩互层,比例 3∶1~7∶1,向上粉砂岩层厚增加。可见交错层理、水平层理、小型斜层理发育 2.3 m
56. 灰绿色薄层状泥灰岩与紫红色薄层状泥岩互层,比例 1∶1,可见古植物根系化石 1.2m
55. 紫红色、暗紫色厚层—块状泥岩,夹少量中层泥灰岩,可见小型双壳类化石 16.4 m
54. 紫红色、灰绿色中厚层状泥灰岩,单层厚 20~75 cm,可见大量虫迹化石,顶部为厚 20 cm 的灰绿色含钙质结核泥岩 3.0 m
53. 紫红色厚层状泥岩,底部 50 cm 含大量钙质结核 6.3 m
52. 底部为厚 20 cm 的钙质泥岩,可见动物骨骼碎片,其上为厚约 1.5 m 的灰紫色网脉状泥灰岩,可见菱形长约 1~2 cm 鱼鳞化石。上部出现大量结核 0.8 m
51. 暗紫色厚层状粉砂质泥岩夹钙质粉砂岩,至顶部钙质含量逐渐增加,层厚减薄至薄层,顶部可见大量钙质结核 14.7 m
50. 暗紫色中薄层状粉砂质泥岩,顶部为一层厚 8 cm 的生物碎屑泥岩,含大量的介形类化石 0.8 m
49. 灰绿色中厚层状钙质粉砂岩夹紫红色中薄层状泥岩,比例 3∶1~10∶1,向上粉砂岩层厚减薄,比例减少。其中可见较大的斜层理,中上部可见脉状层理,可见管状虫迹化石,上部可见水平层理,发育泥裂。底部发育冲刷构造 10.8 m

——————整合接触——————

中侏罗统川街组一段(J_2c^1):

48. 暗紫色中厚层状泥质白云岩夹同色薄中层状泥质粉砂岩,比例 7∶1~15∶1 11.2 m
47. 紫红色中薄层状粉砂岩与泥岩互层,比例 2∶1~5∶1 3.0 m
46. 紫红色中层状泥质粉砂岩与灰绿色钙质粉砂岩,含砾粉砂岩互层,比例 1∶1 2.1 m
45. 灰紫色块状砾岩 0.6 m
44. 紫红色厚层状钙质泥岩夹中薄层状钙质粉砂岩,比例 13∶1。粉砂岩可见砂纹层理,水平层理,泥岩中可见垂直层面的泥岩脉(泥裂),中部可见少量钙质结核 6.1 m
43. 紫红色薄层状粉砂质泥岩与薄层状钙质粉砂岩互层,比例 3∶1~1∶1,顶部为一层厚约 50 cm 的粉砂质泥岩。向上粉砂岩比例逐渐增加。泥岩中可见水平层理,粉砂岩可见小型交错层理。可见宽约 2 mm 的生物潜穴化石,可见泥裂 8.4 m
42. 灰绿色厚层状粉砂岩,下部可见交错层理,上部可见水平层理 1.1 m
41. 灰紫色块状砾岩,向上砾石含量减少、胶结物增加,大致由两个粒度逐渐减小的正粒序组成 10.6 m

~~~~~~~~~~平行不整合~~~~~~~~~~

下侏罗统禄丰组二段(J_1l^2):

40. 灰紫色厚层状泥岩,含少量姜状结核 3.6 m
39. 浅灰绿色中厚层状钙质粉砂岩。发育小型斜层理 1.2 m
38. 紫红色中层状泥岩,可见大量姜状结核 3.8 m
37. 浅灰绿色中—厚层状砂屑灰质白云岩 1.6 m
36. 紫红色厚层状泥岩偶夹灰绿色泥质白云岩 5.0 m
35. 灰绿、紫红色厚层状泥灰岩 1.5 m
34. 浅灰紫色块状泥质白云岩,可见钙质团块 19.2 m
33. 下部为紫红色、灰紫色厚层状粉砂质泥岩,呈楔状。至上部夹少量灰绿色中层状泥灰岩。可见古植物根系化石 10.7 m
32. 下部为灰紫色厚层状白云质泥岩,顶部为厚 35 cm 的泥质白云岩,可见泥岩呈网脉状充填 1.6 m
31. 紫红色厚层状白云质泥岩,含少量灰绿色、黄紫色泥质团块 3.4 m
30. 黄紫色厚层状白云质泥岩,向上黄色比例增加 2.1 m
29. 下部为紫红、灰紫色粉砂质泥岩混层。上部为灰紫色厚层状含姜状结核白云质泥岩,可见不规则状灰绿色泥岩 6.2 m
28. 紫红、灰绿色厚层状泥质粉砂岩,可见细丝状疑似遗迹化石 0.4 m
27. 紫红色薄层状泥质页岩,夹少量灰绿色薄层状泥岩,发育水平层理 3.5 m
26. 浅灰紫色厚层状泥岩,含少量灰色不规则状钙质结核 8.0 m
25. 灰紫色薄层状泥岩。可见少量球状的钙质结核 7.0 m
24. 紫红色中—厚层—块状钙质粉砂岩与同色厚层—块状泥岩互层,比例 1∶1 15.8 m
23. 灰绿色、紫红色中薄层状粉砂岩、泥灰岩与紫红色薄层状泥岩互层,比例 1∶1。砂岩多呈透镜状,可见虫迹化石。粉砂岩中可见水平层理 1.4 m
~~~~~~~~~~

22. 暗紫色中厚层状泥岩夹薄层状泥灰岩、粉砂岩,比例 13∶1。泥灰岩含砂屑。发育小型砂纹层理。至上部可见少量钙质结核　6.4 m
21. 砖红色中厚层状白云质泥岩夹同色中层状钙质粉砂岩,比例 25∶1　13.4 m
20. 暗紫色中层状砾岩,向上砾石含量逐渐减少,渐变为粉砂岩,构成一个正粒序　0.5 m

————————整合接触————————

下侏罗统禄丰组一段(J_1l^1):

19. 灰绿色、暗紫色中厚层状钙质粉砂岩与暗紫色中层状泥岩互层,比例 1∶1~1∶2,上部泥岩中可见钙质结核。底部粉砂岩中可见直径 1 cm 的圆柱状古植物根系化石　4.9 m
18. 暗紫色厚层状泥岩,可见微小的植物碎片化石　2.9 m
17. 紫红色中层状泥质粉砂岩、泥岩与灰绿色薄层状钙质泥岩互层,比例 5∶1,向上灰绿色粉砂岩比例减少,泥岩比例增加。向上钙质结核含量逐渐增加,至顶部含大量钙质结核,可见树枝状生物钻孔　2.0 m
16. 砖红色厚层状泥岩,可见草本植物化石,生物钻孔　0.7 m
15. 暗紫色厚层状泥岩　1.9 m
14. 暗紫色厚层状含钙质结核泥岩　0.7 m
13. 灰绿、紫红色薄—中层状钙质泥岩　1.3 m
12. 浅灰紫色厚层状含钙质结核泥岩　2.3 m
11. 灰绿色中—厚层状钙质粉砂岩　2.0 m
10. 暗紫色厚层块状含钙质结核泥岩。泥岩中可见不规则状灰绿色钙质粉砂岩脉　3.6 m
9. 灰绿、暗紫色中层状泥岩与暗紫色薄层状泥岩互层,比例 5∶1　0.6 m
8. 暗紫色厚层状泥岩　6.7 m
7. 下部为厚 70 cm 的黄色厚层状泥质粉砂岩,其上为灰绿色薄—中层状泥岩。向上出现紫红色泥岩条带,逐渐变为混层　14.2 m
6. 灰色块状粉砂岩、泥质粉砂岩,向上粉砂含量逐渐减少,泥质含量增加,该层孢粉化石丰富,主要为裸子植物孢粉　13.7 m
5. 砖红色中厚层状泥岩夹灰色中层状细砾岩,比例 8∶1　2.5 m
4. 紫红色块状砾岩　30.5 m

~~~~~~~~~~角度不整合~~~~~~~~~~

绿汁江组(Pt_1lz):灰绿色薄层状含石英绢云母千枚岩

禄丰组一段:与前人划分的禄丰组沙湾段大致相同,底部以紫红块状砾岩(图 2a)角度不整合接触于黑山组绢云母千枚岩之上,横向上部分与白云岩接触,接触界面发育古岩溶,褐铁矿壳,为长期暴露风化的结果。中下部为暗紫红色块状泥岩与灰绿色粉砂岩互层(图 2b),向上为暗紫红色、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩夹少量细砾岩、粉砂岩,泥岩多发育姜状结核、钙质结核,为古土壤的典型特征(图 2c)。下部层位为冲积扇沉积,自下而上由粗到细分别对应扇根、扇中、扇端微相,为形成湖泊早期快速凹陷阶段,显示盆地快速凹陷,凹陷速度大于沉积物沉降速度。岩石碎屑颗粒多保留了盆地周缘基底原岩浅变质的特征,显示近源搬运的特征。其间的砂岩多含黄铁矿结核,可能反映快速堆积的还原环境。

禄丰组二段:与前人划分的张家坳段大致相同,底部以一层厚约 50 cm 的紫红色砾岩与禄丰组一段相区分,往上为深红色、灰绿色不等厚泥岩、钙质泥岩、粉砂质泥岩,多含大量古根系、发育钙板(图 2d、e)、姜状结核、铁锰质结核、钙质结核)夹紫红色、灰绿色薄—中层状粉砂岩、泥灰岩(部分网状),粉砂岩中可见波痕(图 2f),泥岩中发育水平层理。本段以成层性差的古土壤层旋回极为发育为特征,其中厚层泥岩中发现了以禄丰龙为代表的大量早侏罗世恐龙化石。沉积环境整体为滨浅湖亚相,粒度的整体变细,显示河流搬运能力下降,可能与气候变化引起的水流量减少有关。

川街组一段:底部以一层灰紫色块状砾岩与禄丰组二段平行不整合接触(图 2g),往北在邓厂亦有直接超覆于寒武系筇竹寺组之上的情况。上部为紫红、灰绿色不等厚粉砂岩、钙质粉砂岩、泥质粉砂岩与同色泥岩、钙质泥岩互层,夹一层灰紫色块状砾岩,下部发育冲刷面(图 2h),层间可见古植物根系(图 2j)。整体为冲积扇亚相过渡为滨浅湖亚相。

川街组二段:底部以一套灰绿色中厚层状钙质粉砂岩夹紫红色中薄层状泥岩与川街组一段为整合接触,上部为紫红、灰绿色不等厚泥岩、钙质泥岩(多含大量姜状结核,发育斑状构造)与同色粉砂岩、钙质粉砂岩、泥质粉砂岩互层,夹数层紫红、灰紫、灰绿色中厚层状泥灰岩。底部发育软沉积变形(图 2k),下部见介壳层(图 2m),普遍发育砂纹层理(图 2n),整体由三角洲平原相发展为浅湖相。

2　样品采集及测试方法

笔者等研究材料均来自野外剖面,剖面出露率高,风化程度低,保证了采样的连续完整性。采样自下而上逐层采样,采取剥蚀地表 20 cm 土层后选择新鲜面采样。不采取等间距采样,采用逐层采样的方法,在每层采取该层表性岩石样品,随即密封保存运输。薄片样品选择代表性的岩性采取样品,重复的类型不采集。选择每层粒度最细的泥质岩、粉砂岩层位采样。
~~~~~~~~~~

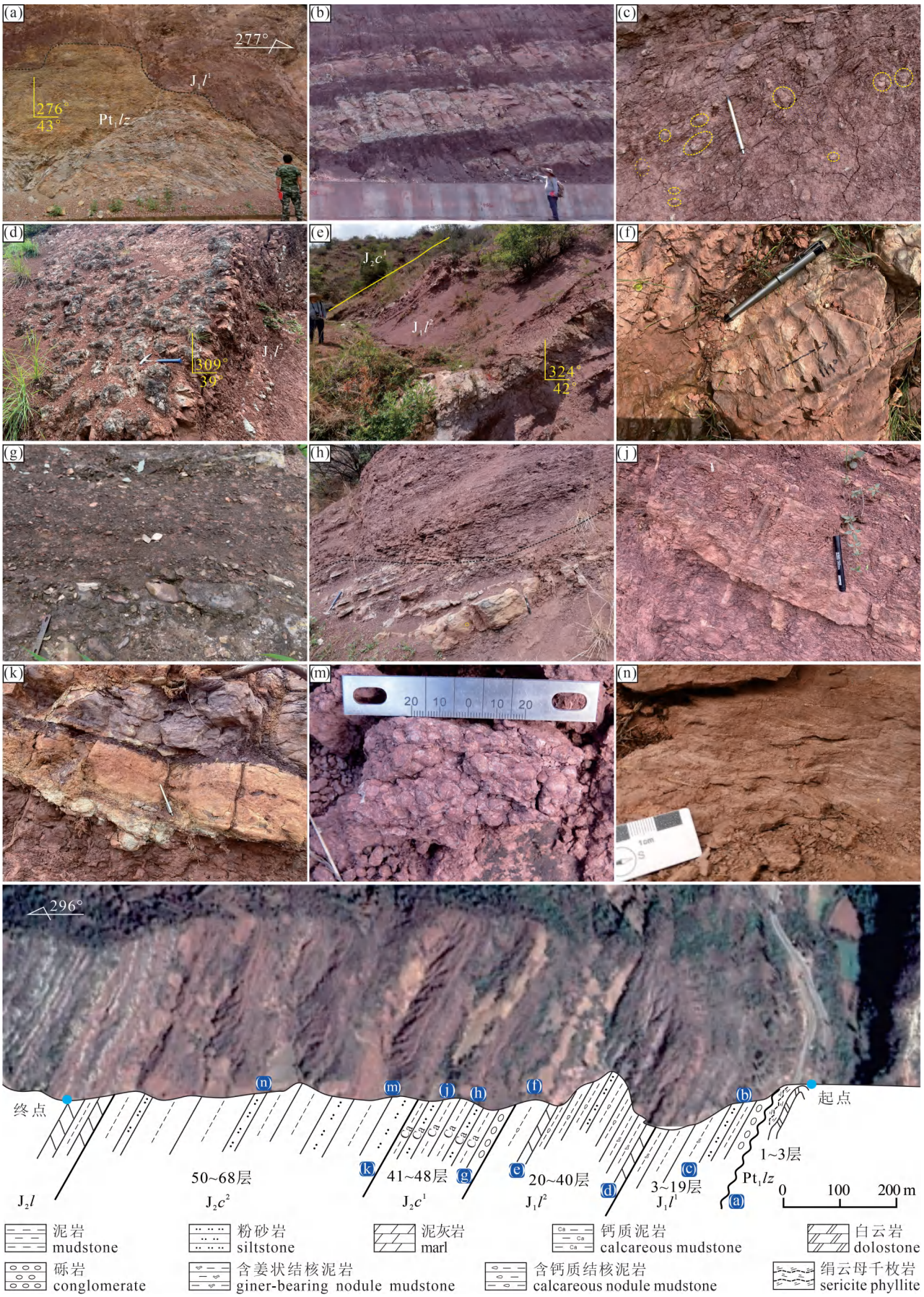
(a)
277°
276°
43°
J_1l^1
Pt_1lz
(b)
(c)
(d)
309°
39°
J_1l^2
(e)
J_2c^1
J_1l^2
324°
42°
(f)
(g)
(h)
(j)
(k)
(m)
20 10 0 10 20
(n)
1cm
296°
终点
起点
(n)
(m)
(j)
(h)
(f)
(b)
(k)
(g)
(e)
(d)
(c)
(a)
50~68层
J_2c^2
41~48层
J_2c^1
20~40层
J_1l^2
3~19层
J_1l^1
1~3层
Pt_1lz
J_2l
0 100 200 m
泥岩 mudstone
粉砂岩 siltstone
泥灰岩 marl
钙质泥岩 calcareous mudstone
白云岩 dolostone
砾岩 conglomerate
含姜状结核泥岩 giner-bearing nodule mudstone
含钙质结核泥岩 calcareous nodule mudstone
绢云母千枚岩 sericite phyllite

图 2 云南禄丰川街盆地老文村剖面实测剖面简图及主要地层特征:(a)禄丰组一段底部砾岩角度不整合接触于绿汁江组之上;(b)禄丰组一段紫红色块状泥岩与灰绿色粉砂岩互层;(c)禄丰组一段中部泥岩中钙质结核;(d)禄丰组二段下部钙结壳;(e)禄丰组二段上部钙结壳及古土壤;(f)禄丰组二段上部波痕;(g)川街组一段底部钙质胶结砾岩;(h)川街组一段底部(41 层)钙质胶结砾岩镜下特征;(j)川街组一段中部植物根系;(k)川街组二段底部沉积变形;(m)川街组二段下部介壳化石;(n)川街组二段砂纹层理;遥感影像来源于谷歌地图

Fig. 2 Sketch and main stratigraphic characteristics of the measured profile of the Laowencun section in the Chuanjie Basin, Lufeng, Yunnan: (a) the angle unconformity of conglomerate at the bottom of the First Member of the Lufeng Formation is in contact with the Lvzhijiang Formation; (b) purplish red massive mudstone interbedded with grayish green siltstone in the First Member of the Lufeng Formation; (c) calcareous nodules in mudstone in the middle of the First Member of the Lufeng Formation; (d) calcium crust in the lower part of the Second Member of the Lufeng Formation; (e) calcium crust and paleosol in the upper part of the Second Member of the Lufeng Formation; (f) wave marks in the upper part of the Second Member of the Lufeng Formation; (g) calcareous cemented conglomerate at the bottom of the First Member of the Chuanjie Formation; (h) microscopic characteristics of calcareous cemented conglomerate at the bottom of the First Member of the Chuanjie Formation (layer 41); (j) plant roots in the middle of the First Member of the Chuanjie Formation; (k) sedimentary deformation at the bottom of the Second Member of the Chuanjie Formation; (m) lower crustacean fossils of the Second Member of the Chuanjie Formation; (n) sand bedding of the Second Member of the Chuanjie Formation; remote sensing image from Google Maps

样品常量元素和微量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。常量元素使用 Axios X 射线荧光光谱仪(XRF, Panalytical B. V)测试,微量使用 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)进行痕量元素分析;测试方法如下:① 称岩石样品 50 mg 过 750 nm 筛,经过烘干处理,将粉末置于溶样器中;② 依次加入硝酸、盐酸、氢氟酸混合,对样品进行密封处理,消解放置过夜;③ 将样品置于恒温加热板上,在 150℃条件下蒸干 12 h,用 2%的盐酸稀释,移入干净的聚乙烯容量瓶中,定容摇匀。样品检测过程中使用标准物质作为质量监控样,并且重复检测,样品分析误差<5%(质量分数)。

3　测试结果分析

微量元素的含量及比值关系等一定程度上受控于沉积环境和气候背景,它们与周围环境物理化学条件之间存在着复杂的地球化学平衡,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(梁文君等,2015)。目前利用细碎屑岩元素地球化学特征对古气候、氧化还原条件、水体古盐度等进行反演的研究已相当成熟,国内外学者都在此方面做了大量的工作并取得了较好成果。

目前,常用的古盐度的计算方法包括硼元素法和黏土矿物计算法及微量元素比值法等,氧化还原条件目前较为成熟应用的常用敏感元素有 U、V 和 Mo 等,铀通常在氧化性液体中呈+6 价态,易与碳酸根离子结合形成相对稳定的化合物,而在还原性环境中,铀易被还原为+4 价态,多以较为稳定络合物的形式存储到在沉积物之中(李得路,2018;于海田等,2021)。古生产力的替代指标主要包括生源沉积物指标(TOC 等)、稳定同位素、微量元素指标(如 Ba/Al、Mo、Al/Ti 等)、生物标志化合物等。本次研究所获部分元素含量见表 1。

3.1　干湿环境

3.1.1　化学风化蚀变指数

化学蚀变指数(CIA)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,前人通过研究给出了定量分析化学蚀变作用强度的计算公式(McLenman et al., 1993; Nesbitt et al., 1982):

$$CIA=\frac{100\times n(Al_2O_3)}{n(Al_2O_3)+n(CaO^*)+n(Na_2O)+n(K_2O)}$$

式中 CaO^* 表示硅酸盐中的 CaO, MclenNan(1993)根据自然界硅酸盐中 Na 和 Ca 的平均组成,依据 CaO/Na_2O 的摩尔比值来校正 CaO 的含量,矫正公式:若 $n(CaO)-\frac{10}{3}\times n(P_2O_5)<n(Na_2O)$,则取 $n(CaO)$作为 $n(CaO^*)$,反之则取 $n(Na_2O)$作为 $n(CaO^*)$。当沉积物经历过强烈的化学风化作用,

其 *CIA* 值位于 80~100 之间,代表炎热潮湿的热带气候环境;经历中等风化过程,其 *CIA* 值位于 65~80 之间,代表温暖湿润的气候环境;当 *CIA* 值位于 50~65 之间时,表明沉积物经历了较弱的化学风化过程,指示寒冷干燥的气候环境。

根据计算结果,禄丰组 *CIA* 值位于 64~81 之间,平均值 73,总体属于温暖湿润型气候,自下而上化学风化蚀变指数逐渐降低,表明有逐渐偏向相对干燥的趋势,期间指数伴随着较为频繁的波动,其中在 27 层和 40 层 CIA 值降至 64,显示化学风化强度骤然下降,表现为极端干燥的环境,而在 4 层和 26 层则出现较为短暂的炎热潮湿气候;川街组 *CIA* 值位于 69~75 之间,平均值为 72,该组经历了中等风化过程,*CIA* 值总体较为稳定,无明显波动,属于温暖湿润的气候环境。

3.1.2 Sr/Cu 值

沉积物中一些微量元素会因受到影响而在沉积物中相对含量发生巨大差异,如 Sr 被认为是喜干型元素,而 Cu 则为喜湿型元素,二者的比值对古气候具有灵敏的指示意义。Lermanm(1989)建立的 Sr/Cu 比值与沉积时期古气候的对应关系指出,当二者比值介于 1~10 之间,表明成岩气候湿润,大于 10 则为相对干旱的气候(代军,2021)。

根据 Sr/Cu 值来看,研究区侏罗系禄丰组和川街组气候总体属于炎热干旱型,同时也存在短暂相对湿润的气候期。其中,4~27 层气候较为稳定,Sr/Cu 值位于 1.9~11.7 之间,平均值 6.8,总体属于半湿润型,伴随着小幅度干旱气候的转变,并有逐渐干旱的趋势;28~40 层之间气候变化较为剧烈,Sr/Cu 值位于 3.9~43.8 之间,平均值 22.0,分别在 33 层和 39~40 层之间发生了两次剧烈的气候波动,表现为气候的急剧干旱;41~68 层气候相对稳定,Sr/Cu 值位于 2.8~14.6,平均值 6.5,总体属于半湿润型,自下而上有逐渐向湿润型气候转变的趋势,期间伴随着小幅度气候波动。

3.2 古盐度

在古盐度的分析中,有学者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 质量比以及 B/Ga 质量比等,但各项指标对古盐度的指示均存在一定的差异,其中以 B/Ga 质量比表现为较好的指示意义,微量元素 B 在水中主要以硼酸(H_3BO_3)及其解离产物(H_3O^+和 $H(OH)_4^-$)的形式存在。在沉积水体中,B 元素会被黏土矿物吸附在其薄片边缘,然后由于静电作用在薄片边缘被固定下来,最终因新物质的增长和 B 元素的扩散作用进入黏土矿物晶格中。黏土矿物中 B 元素含量与沉积水体中的 B 元素含量呈正比,而且水体中的 B 元素含量还与水体盐度呈正比,因此黏土矿物中 B 元素含量与水体盐度亦呈正比关系。B 元素与 Ga 元素的化学性质不同,相对来说,硼酸盐有较大的溶解度和较强的迁移性,只有当水蒸发后才析出;相反,Ga 元素活动性相对较差,容易沉淀。因此,B/Ga 值可指示古盐度。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(张秀莲等,1985;孙立广等,2000)。

B/Ga 值指示的水体盐度表明,研究区禄丰组与川街组 B/Ga 值总体处于 3~6 之间,属于半咸水环境,二者界线附近为水体注入的沉积转换期,由剧烈的咸水环境转换为半咸水环境。其中,禄丰组 B/Ga 值曲线呈锯齿状波动并逐渐升高的趋势,且存在 3 个水体由半咸水环境向咸水环境过渡的阶段,分别位于 21 层、29~32 层和 34 层之间,盐度值最高可达 7.6,蒸发量远大于补给量,指示了长期干燥少雨强烈蒸发的环境;川街组水体盐度总体保持平稳,位于 4~6 之间,水体蒸发量与补给量相对保持稳定,但同样存在两个较小幅度的阶段性咸水环境,分别位于中部和顶部,B/Ga 值最高为 6.9。

3.3 古氧相

气候条件影响着生物活性,从而影响着水体的氧化还原环境。在温暖湿润气候条件下,生物大量繁殖,一方面植物通过光合作用吸收大气中的 CO_2,大气中氧分分压大,湖盆中氧分难逸散到大气中,湖盆呈氧化环境;另一方面湖盆中生物骨骼的营造需要消耗水体中 Ca 和 CO_2,从而使湖盆为氧化环境。处于干热气候时,生物丰富度降低,导致 CO_2 消耗速度随之降低。同时,水体中 CO_2 逸散程度降低,氧分逸散程度增高,湖盆呈相对还原状态。氧化还原指标虽不能直接判断古气候,但可以间接指示古气候特征(樊秋爽等,2012)。

细粒沉积物的氧化还原敏感元素比值已被广泛应用于古沉积环境判识的恢复中(例如 V/Cr、V/(V+Ni)、U/Th 和 δU),相比于通过单个元素含量高低,微量元素比值在进行古氧化还原条件判断时具有抗干扰、相对稳定等特征。通常在陆相沉积盆地中,V/Cr>4.25 指示强还原环境,V/Cr<2.00 指示氧化环境;U/Th>1.25 指示强还原环境,< 0.75 指示氧化环境(王换玲,2021)。

表 1 云南禄丰川街盆地老文村剖面禄丰组—川街组岩石地球化学数据表

Table 1 Petrogeochemical data of the Lufeng Formation—Chuanjie Formation in the Laowencun Section in the Chuanjie Basin, Lufeng, Yunnan

样品原号	Al_2O_3	K_2O	烧失	Na_2O	CaO	As	B	Cr	Cu	Ga	Hg	Ni	Sc	Sr	Th	U	V
	(%)					(μg/g)											
PM006-4-1HJ	18.80	3.80	5.04	0.10	0.31	11.7	120	110	19.0	25.1	0.034	75.2	16.9	60.2	17.8	3.62	166
PM006-5-1HJ	19.20	4.53	8.17	0.26	3.61	2.34	91.9	123	9.47	24.6	0.045	54.6	18.8	96.4	17.6	2.77	185
PM006-7-1HJ	16.85	3.72	6.78	0.20	1.84	0.83	79.9	91.5	38.9	22.0	0.024	46.4	16.4	73.5	15.4	2.64	146
PM006-8-1HJ	14.02	3.08	3.64	0.097	0.22	8.47	109	85.9	12.8	21.2	0.017	21.5	12.9	29.1	16.2	2.44	83.2
PM006-9-1HJ	13.55	2.56	7.76	0.89	4.82	1.63	86.7	80.5	19.8	16.8	0.060	40.4	11.4	84.5	12.2	2.16	116
PM006-10-1HJ	12.46	2.06	3.54	1.01	0.52	1.42	80.2	67.7	11.6	14.9	0.061	34.4	9.93	71.5	11.4	2.01	105
PM006-12-1HJ	17.37	3.82	8.96	0.36	4.48	2.67	84.7	108	10.1	21.6	0.031	52.0	16.3	92.8	16.8	2.48	147
PM006-13-1HJ	10.47	1.88	12.20	1.00	10.46	0.61	56.4	62.9	10.0	12.6	0.055	28.8	9.10	93.5	10.8	2.72	78.2
PM006-14-1HJ	14.30	3.13	12.90	0.46	9.99	2.24	76.9	96.3	9.95	18.4	0.015	44.2	14.5	99.0	14.6	2.51	127
PM006-15-1HJ	18.14	3.58	5.40	0.34	0.50	8.42	91.9	107	16.4	22.5	0.022	55.5	16.5	88.9	17.1	2.69	164
PM006-16-1HJ	14.17	3.06	11.00	0.68	8.06	2.52	75.3	87.0	10.8	17.4	0.028	41.9	13.2	97.8	14.2	2.27	138
PM006-17-1HJ	17.38	3.74	9.32	0.50	4.51	2.65	86.6	106	11.3	21.2	0.041	52.4	15.0	98.9	16.2	2.43	149
PM006-18-1HJ	17.03	3.69	8.80	0.59	5.11	3.57	86.0	102	12.3	21.5	0.019	49.7	16.8	105	16.0	2.72	162
PM006-19-1HJ	15.70	3.12	10.80	0.43	8.37	3.39	86.9	94.8	17.9	19.4	0.064	48.4	15.2	101	13.8	2.26	152
PM006-20-1HJ	9.54	0.95	6.42	0.42	4.56	4.00	73.2	62.1	16.3	13.4	0.020	26.6	9.04	70.2	10.9	1.99	67.1
PM006-21-1HJ	8.36	1.44	14.10	0.63	14.80	3.40	64.3	29.2	16.2	10.4	0.007	16.3	7.61	106	31.3	1.74	37.4
PM006-22-1HJ	13.85	1.94	5.38	1.03	2.50	2.96	80.5	75.6	19.9	17.2	0.012	34.0	11.9	95.0	14.0	2.45	90.6
PM006-23-1HJ	17.36	3.40	6.47	0.68	2.59	5.09	99.6	91.4	17.4	22.3	0.035	42.2	16.0	151	13.1	2.96	108
PM006-24-1HJ	9.76	1.54	12.60	0.82	10.84	3.10	67.4	66.7	21.6	12.3	0.007	30.3	8.94	158	12.3	2.31	99.7
PM006-25-1HJ	13.51	1.59	9.12	0.42	5.98	5.49	79.7	80.7	16.0	16.0	0.008	34.4	11.9	88.1	13.0	2.32	88.0
PM006-26-1HJ	11.60	0.98	14.00	0.50	12.24	3.94	57.3	81.3	17.4	14.2	0.012	34.9	10.8	112	13.8	2.26	106
PM006-27-1HJ	21.02	4.45	7.76	0.55	2.31	4.66	107	101	17.3	25.3	0.013	42.7	16.0	202	13.3	3.18	133
PM006-28-1HJ	10.57	1.54	7.28	1.32	3.66	2.60	61.2	67.4	32.3	13.3	0.012	32.8	10.0	125	10.6	2.13	98.3
PM006-29-1HJ	12.09	2.16	10.10	1.06	5.06	5.27	74.0	76.1	24.5	15.2	0.016	37.0	11.1	195	11.9	2.36	108
PM006-30-1HJ	10.41	2.02	20.55	0.28	15.24	11.8	80.9	64.4	8.77	12.2	0.006	24.4	9.52	278	9.74	2.02	79.2
PM006-31-1HJ	12.50	2.81	18.20	0.36	11.40	9.25	90.9	79.3	13.1	15.5	0.007	37.8	12.4	349	12.4	2.73	100.0
PM006-32-1HJ	9.29	2.19	25.00	0.42	17.00	4.97	85.9	64.6	13.0	12.3	0.006	26.0	10.4	535	9.49	3.07	78.8
PM006-33-1HJ	15.75	2.80	5.79	0.89	1.78	5.22	82.0	95.4	22.9	19.7	0.025	44.8	14.4	111	14.0	2.50	126
PM006-34-1HJ	9.75	2.71	23.90	0.40	16.42	3.47	90.8	60.5	18.2	11.9	0.003	29.6	9.64	471	9.80	1.77	73.0
PM006-36-1HJ	11.77	3.30	20.40	0.51	13.18	4.49	102	70.0	19.0	13.7	0.004	35.1	10.9	431	10.4	2.13	88.2
PM006-37-1HJ	6.55	1.25	27.85	0.59	17.98	5.69	50.9	41.6	18.0	9.04	0.027	23.2	12.4	789	6.72	1.89	86.2
PM006-40-1HJ	8.23	1.31	16.60	0.94	15.14	3.83	50.7	49.2	17.5	10.7	0.011	23.6	8.42	206	8.54	2.23	55.2
PM006-43-1HJ	14.85	2.68	7.65	0.96	4.74	5.58	80.1	97.8	15.0	18.9	0.008	56.5	15.0	112	13.0	2.70	125
PM006-44-1HJ	15.15	3.11	12.30	0.54	10.14	4.63	97.3	109	12.7	19.0	0.023	52.0	15.4	169	12.8	2.82	128
PM006-47-1HJ	14.58	2.56	6.71	0.98	3.57	3.97	83.7	93.2	23.7	18.6	0.006	49.3	14.2	94.5	13.1	2.77	126
PM006-48-1HJ	15.93	3.08	8.45	0.80	5.20	6.07	89.9	101	23.4	20.3	0.008	51.8	15.7	111	14.2	3.09	137
PM006-50-1HJ	8.45	1.68	21.50	0.50	22.56	3.38	55.3	58.8	18.0	11.6	0.018	29.0	9.27	170	8.66	1.99	76.4
PM006-51-1HJ	5.32	1.15	30.65	0.26	33.28	2.39	37.1	52.9	27.4	7.47	0.020	17.3	6.79	272	5.28	1.55	46.7
PM006-52-1HJ	15.30	2.85	8.31	0.70	5.47	5.64	81.3	97.5	23.9	19.0	0.011	54.6	15.3	102	13.5	2.79	131
PM006-53-1HJ	17.50	3.50	7.90	0.66	3.98	8.63	108	109	19.9	21.8	0.010	60.0	17.2	104	15.0	2.81	146
PM006-54-1HJ	5.43	1.19	30.55	0.28	32.60	2.01	34.8	55.2	17.1	7.30	0.018	15.3	6.07	250	5.03	1.13	47.8
PM006-55-1HJ	16.43	3.35	7.37	0.72	5.14	6.21	86.4	99.7	23.2	21.2	0.015	53.4	16.7	113	15.0	2.86	130
PM006-58-1HJ	13.42	2.53	7.02	0.82	4.53	4.89	87.5	82.1	34.5	16.8	0.010	46.4	12.6	96.4	11.1	2.56	114
PM006-59-1HJ	13.04	2.64	9.37	0.76	5.40	8.15	95.8	93.5	29.9	18.5	0.004	51.9	15.1	112	13.5	2.66	118
PM006-60-1HJ	14.75	3.07	10.80	0.64	7.07	6.73	92.8	95.0	23.5	19.6	0.005	53.3	16.0	127	13.9	2.78	123
PM006-61-1HJ	8.09	1.80	27.45	0.25	28.21	1.97	68.9	59.2	21.3	9.93	0.011	23.5	8.14	239	6.94	1.50	64.4
PM006-62-1HJ	15.84	3.41	10.10	0.62	7.16	10.9	96.6	99.5	24.8	20.6	0.004	57.0	16.9	133	15.0	2.91	124
PM006-63-1HJ	16.32	3.52	8.71	0.56	5.80	7.06	99.2	102	27.0	22.1	0.015	56.7	17.6	129	15.0	3.07	156
PM006-64-1HJ	14.10	2.74	8.98	0.96	6.72	5.47	88.0	87.9	28.2	17.9	0.005	46.6	14.2	132	12.2	2.68	114
PM006-65-1HJ	12.77	2.54	10.90	0.88	9.14	4.86	82.4	80.5	27.3	16.0	0.005	41.4	12.4	138	11.3	2.38	98.2
PM006-66-1HJ	13.48	3.06	14.70	0.52	13.20	4.50	92.3	84.4	24.1	17.1	0.11	41.1	14.0	158	12.8	2.81	116

样品原号	Al_2O_3	K_2O	烧失	Na_2O	CaO	As	B	Cr	Cu	Ga	Hg	Ni	Sc	Sr	Th	U	V
	(%)					(μg/g)											
PM006-67-1HJ	15.87	3.52	9.28	0.78	5.60	11.7	98.3	98.7	24.2	20.8	0.008	54.9	16.5	123	14.4	2.92	126
PM006-68-1HJ	16.24	3.57	8.36	0.80	4.38	8.89	110	98.6	22.9	21.2	0.011	52.4	16.4	113	14.6	3.04	146
PM006-69-1HJ	11.90	3.10	19.20	0.42	17.40	4.24	88.6	79.4	29.5	14.2	0.010	34.3	11.3	184	10.3	2.80	101

工作区 V/Cr 平均值为 1.33,指示富氧环境,仅 37 层为 2.07,为贫氧—次富氧环境,整体上是氧化环境。工作区 U/Th 平均值为 0.2,最大值为 0.32,最小值 0.05,皆位于氧化环境范围内。显示整体处于长期的氧化环境。但整体上下部氧化和强氧化环境间的波动较为频繁,至上部则整体几乎无波动,转变为较稳定的强氧化环境。

3.4 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 $\delta^{18}O$ 值并不能准确代表古封闭湖泊的 $\delta^{18}O$ 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 含量对禄丰地区古温度进行恢复(王换玲,2021)。计算公式为:

$$Y(Sr) = 2578 - 80.8T$$

根据古温度计算数据来看,禄丰组一段至禄丰组二段中部温度位于 29.41~31.55℃之间,平均值 30.68℃,古温度曲线总体平稳,无明显波动;禄丰组二段中部至顶部温度位于 22.14~30.52℃之间,平均值 27.85℃,波动较为剧烈,呈逐渐降温的趋势,其中在 32 层和 37 层发生两次较为强烈的降温事件,温度分别降至 25.28℃、22.14℃,温差可达 8℃;进入川街组古温度骤然回升,温度位于 28.54~30.74℃,平均值 30.14℃,温度较为稳定,仅存在小幅度的波动。

4 讨论

4.1 川街盆地早—中侏罗世气候变化特征

侏罗纪古地理是典型的泛大陆,多数板块汇聚形成的盘古大陆横贯南北半球,周围围绕着巨大的特提斯洋,当时低纬度的低山地区受巨型季风大气环流(mega-monsoonal atmospheric circulation)控制,形成了广阔的亚热带干旱带。黄宝春等(2005)对川街盆地早中侏罗系的古地磁的研究表明禄丰盆地早侏罗世古纬度位于 30°N 至 40°N 附近,受该干旱带影响。

根据野外剖面情况来看,禄丰组和川街组陆源碎屑沉积物多为红色、紫红色,并含有少量的泥灰岩、钙质泥岩夹层,普遍含致色矿物赤铁矿,本身就代表了一种偏炎热干旱的气候环境。其中禄丰组二段整体粒度变细,可能与干旱条件下的河流流量减少有关系,古土壤层大量发育则直接指示了该沉积期存在多期的干旱导致的沉积间断。结合本次剖面测制中地球化学数据显示来看,早中侏罗世川街盆地水体总体处于较稳定的强氧化、高盐度环境,局部发生强烈的气候波动,可将其划分为 3 个阶段:

Ⅰ阶段气候总体趋于稳定,化学风化指数整体较强,Sr 温度计和 Sr/Cu 值指示了较为稳定的高温、湿润环境,同时也有一定的氧化还原和水体盐度的小范围波动,其中在 21 层突然有大量白云岩的增量,U/Th 值和 V/Cr 值指示这一时期更为强烈的氧化环境,表明水体变浅,同时伴随着 B/Ga 值的升高,即盐度的增加,该阶段以高温、湿润为主,同时伴随着短暂的干湿交替。

Ⅱ阶段气候波动较剧烈,共发生两次气温骤变,第一次发生在 32~33 层之间,该阶段初期化学风化突然减弱,表明降雨的锐减,白云石含量由突增至骤减,石英含量则急剧增加,表明该时期外源风化带入的碎屑物增多,同时,Sr/Cu 比值的快速上升也证明了该时期干旱程度加剧,二者比值最高可达 40,表明已进入极度干旱的环境,随之而来的便是湖泊水体快速减少造成的高盐度水体以及强氧化作用的减弱,而 38~40 层之间的各种指标变化更为强烈,代表了更为干燥的气候环境,两次气温降低之后均发生了快速回升,该阶段具有“缓降骤升”的特征。

Ⅲ阶段主要为中侏罗统川街组,气候总体趋于平稳,同样伴随着小幅度的波动,气温整体偏高,气候较为干燥,但自下而上具有逐渐向湿润环境转变的趋势。在 51~52 层之间和 60 层发生两次小幅度的气候波动,均伴随着气温的降低及气候的干燥程度的增加,同时造成水体盐度上升及氧化作用的加强,但主体还是以高温、干燥为主。

4.2 早—中侏罗世气候事件在陆相红层的响应

大量研究表明,侏罗纪是地质历史上典型的温室时期之一,但在如此之长的时间中,气候并非一直保持高温干热的状态,有学者研究指出,该时期气候发生过剧烈的变化,无论是温度还是湿度都经历过强烈的起伏波动。前人通过早—中侏罗世海相地层

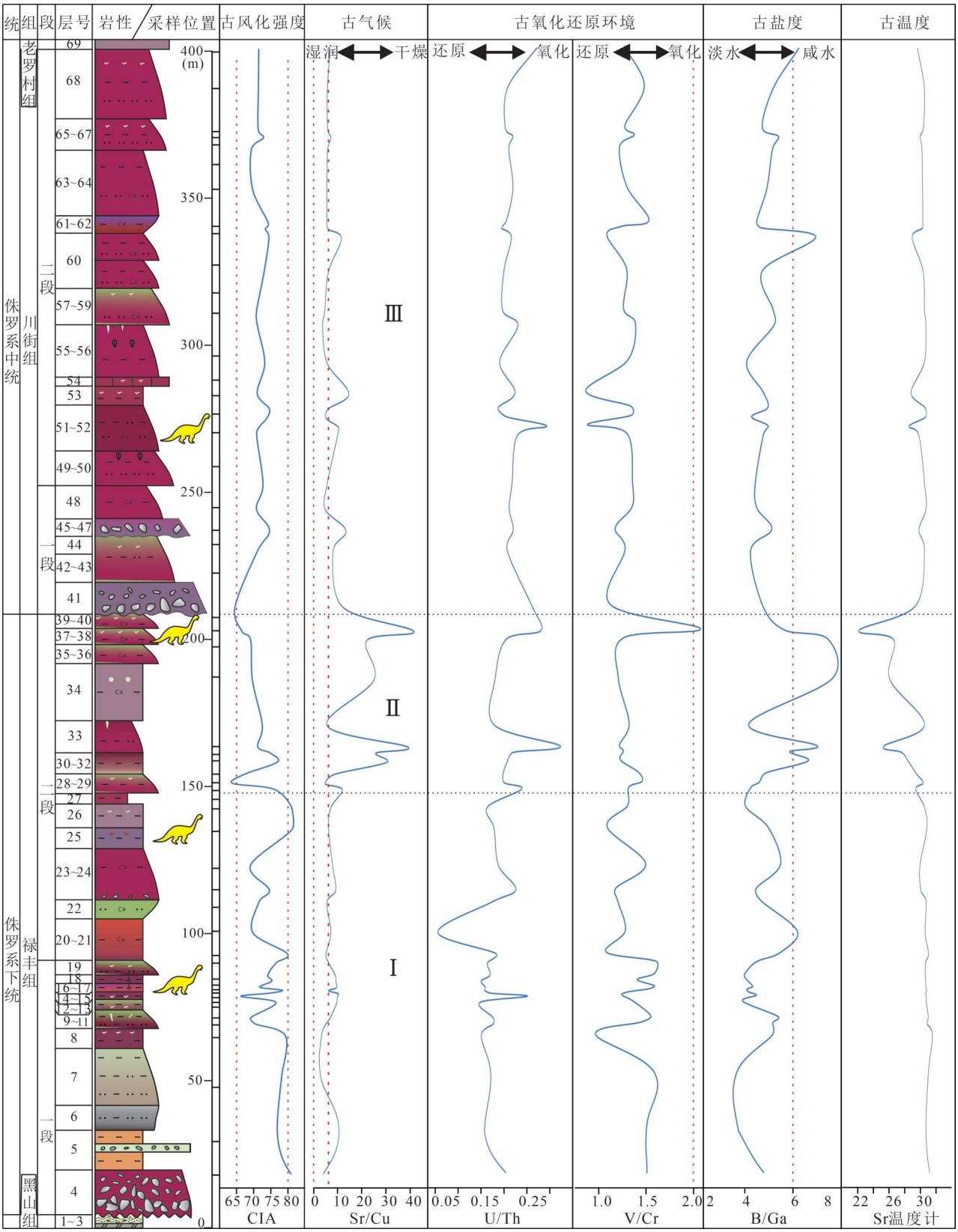

图 3 云南禄丰川街盆地老文村剖面禄丰组—川街组岩石地球化学综合柱状图(标尺右侧的黑色粗线代表采样位置)

Fig. 3 Comprehensive histogram of petrogeochemistry of the Lufeng Formation—Chuanjie Formation in the Laowencun section, Chuanjie Basin, Lufeng, Yunnan (the black thick lines right side of the scale represent the sampling locations)

的气候研究认为,在普林斯巴赫期到图阿尔期海水温度发生过较为强烈的升降波动,先是从普林斯巴赫晚期到图阿尔早期气温的下降期,而后气温突然上升。早侏罗世的扬子板块西缘多位于热带地区,气候总体为热带气候(邓胜徽等,2017),根据本次剖面的研究,地球化学特征表现为早期较为稳定的气候特征,以高温干燥为主,同时也伴随着短暂的干湿交替,早侏罗世晚期,Sr 温度计显示其温度缓慢降低,达到一定程度之后急剧上升,表现为“缓降骤升”的特征,而这一次温度的急剧上升与全球海洋生态系统发生的大洋缺氧事件(简称 T—OAE)及升温事件对应,表明海相环境与陆相环境在气候变化上具有相对一致性,同时伴随着水体氧化环境的急剧增强以及盐度升高,Sr/Cu 比值也表现为气候的极度干燥,说明此次 T—OAE 事件在陆相地层中也有很好的响应。

4.3 气候对恐龙生存及埋藏的影响

侏罗纪是恐龙化石大量保存的一个特殊时期,在此期间,云南禄丰保存了大量的恐龙足迹和骨骼化石,前人对研究区的恐龙骨骼化石及分布等做了大量研究(杨钟健等,1951;方晓思等,2008)。从禄丰地区恐龙的宏观埋藏情况来看,单个埋藏层的恐龙呈混杂堆积,其骨骼骨架均遭受不同程度的破坏,多以柱状或长条状形态保存,体现了一个恐龙集群快速死亡、遭受搬运而异地埋藏的特点(胡海虔,2016),尸体在较短的近地表暴露期遭遇突发的地质事件则会快速埋藏,并形成保存极好的化石,空间分布上,则主要集中在川街老长箐和大洼恐龙山地区,可见几十条恐龙在较小的空间集体埋藏,而在盆地南侧则未发现恐龙化石,具有局部高度富集的特征,从恐龙埋藏的种类来看,集体埋藏的恐龙多为同种类,只是个体大小存在差异;微观埋藏学对骨骼微裂隙的研究显示了其埋藏前极度干旱的气候环境。研究表明,全球侏罗纪恐龙化石的分布存在强烈的干湿差异,约 80%的恐龙化石分布在以热带沙漠气候为主的干旱带,禄丰地区则属于具有明显干湿两季的热带草原气候(Gardner et al., 2016;申欢,2021)。

根据目前在禄丰地区已发现的恐龙化石来看,禄丰组恐龙化石极为丰富,杨钟健等(1951)提出禄丰组主要有 3 个含恐龙化石层位,且以禄丰蜥龙动物群为主,分别位于禄丰组一段下部、禄丰组一段上部和禄丰组二段上部。结合本次剖面情况,在 11~19 层、25~26 层和 37~40 层均发育大量指示极度干旱、暴露环境下的姜状结核或钙质结核,同时地球化学指标也在该层位发生较大幅度的波动(图 3),特别是在 T—OAE 事件附近,恐龙死亡埋藏的更为普遍和集中,上述特征表明气候环境的剧烈波动和恐龙的大量死亡埋藏具有密不可分的联系,极度干旱的气候环境更有利于恐龙死亡后化石的形成。

5 结论

(1)滇中禄丰川街盆地早—中侏罗世气候可划分为 3 个阶段:①气候稳定期,总体以高温、湿润为主,期间伴随着较为频繁的干湿交替;②气候波动期,总体呈现逐渐降温的趋势,具有“缓降骤升”的特征,其中发生两次强烈的气候波动;③气候稳定,以高温、干燥气候为主。

(2)滇中地区早中侏罗世陆相地层具有与海相地层较为一致的气候变化趋势,同时识别出 T—OAE 事件在滇中陆相红层中的响应。

(3)恐龙的大量死亡埋藏与气候的突然变化引起的环境剧变有关,T—OAE 事件可能是恐龙集中埋藏的重要诱因之一。

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)

程先钰, 张天福, 程银行, 刘行, 胡鹏, 吴志伟, 吴志宇. 2022. 准噶尔盆地东缘中—晚侏罗世细碎屑岩地球化学特征: 物源与古沉积环境恢复. 地质通报, 41(11): 1950~1966.

代军. 2021. 鄂西秭归盆地早侏罗世泥岩地球化学分析及其古环境意义. 导师: 姜宝玉, 王永栋. 南京: 南京大学硕士学位论文: 1~62.

邓胜徽, 卢远征, 赵怡, 樊茹, 王永栋, 杨小菊, 李鑫, 孙柏年. 2017. 中国侏罗纪古气候分区与演变. 地学前缘, 24(1): 106~142.

樊秋爽, 夏国清, 李高杰, 伊海生. 2012. 古海洋氧化还原条件分析方法与研究进展. 沉积学报, 40(5): 1151~1171.

方晓思, 李佩贤, 张志军, 程政武, 庞其清, 张子雄, 黄宝春. 2008. 滇中侏罗纪红层. 北京: 地质出版社: 1~111.

胡海虔, 2016. 云南禄丰下侏罗统禄丰组恐龙足迹与骨骼化石埋藏学研究. 导师: 张建平. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~58.

胡修棉, 李娟, 韩中, 李永祥. 2020. 中新生代两类极热事件的环境变化、生态效应与驱动机制. 中国科学:地球科学, 50(8):1023~1043.

黄宝春, 李永安, 方晓思, 孙东江, 庞其清, 程政武, 李佩贤. 2005. 滇中禄丰地区侏罗系磁性地层学研究. 地质通报, 24(4): 322~328.

李得路. 2018. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组长 7 油页岩地球化学特征及古沉积环境分析. 导师: 李荣西. 西安: 长安大学博士学位论文: 1~98.

梁文君, 肖传桃, 肖凯, 林婉. 2015. 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. 中国地质, 42(4): 1079~1091.

邵磊, 刘志伟, 朱伟林. 2000. 陆源碎屑岩地球化学在盆地分析中

的应用. 地学前缘, 7(3): 297~304.
申欢. 2021. 侏罗纪全球气候古地理演化及其对恐龙化石分布的约束. 导师: 王成善. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~161.
孙立广, 谢周清, 赵俊琳. 2000. 南极阿德雷岛湖泊沉积物 Sr/Ba 与 B/Ga 比值特征. 海洋地质与第四纪地质, 20(4): 43~46.
王换玲. 2021. 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, 导师: 李琦, 刘新社. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~61.
王娅明. 2017. 云南禄丰盆地早侏罗世基干蜥脚型类恐龙研究. 导师: 王训练. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~216.
许中杰, 程日辉, 张莉, 王嘹亮, 孔媛. 2012. 华南陆缘晚三叠—早、中侏罗世海平面相对升降与古气候演化的地球化学记录. 地球科学(中国地质大学学报), 37(1): 113~124.
杨钟健. 1951. 禄丰蜥龙动物群. 中国古生物志, 新丙种. 北京: 科学出版社: 1~94.
于海田, 许中杰, 程日辉, 王嘹亮, 高丹, 胡小强, 张振. 2021. 北黄海盆地中侏罗世—早白垩世构造体制转换期的古气候演化及元素地球化学响应. 地球科学, 46(3): 1100~1118.
张天福, 孙立新, 张云, 程银行, 李艳锋, 马海林, 鲁超, 杨才, 郭根万. 2016. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义. 地质学报, 90(12): 3454~3472.
张秀莲. 1985. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系. 沉积学报, 3(4): 17~30.
Cheng Xianyu, Zhang Tianfu, Cheng Yinhang, Liu Xing, Hu Peng, Wu Zhiwei, Wu Zhiyu. 2022&. Element geochemical characteristics of the Middle—Late Jurassic Microclastic rock in the Easthern Junggar Basin: implications for tracing sediment sources and paleoenviroment estoration. Geological Bulletin of China, 41(11): 1950~1966.
Dai Jun. 2021&. Geochemical Characteristics and Paleoenvironmental Significance of Mudstones from the Lower Jurassic in the Zigui Basin, Western Hubei Province, China. Tutor: Jiang Baoyu, Wang Yongdong. Nanjing: Master Degree Thesis of Nanjing University: 1~62.
Deng Shenghui, Lu Yuanzheng, Zhao Yi, Fan Ru, Wang Yongdong, Yang Xiaoju, Li Xin, Sun Bainian. 2017&. The Jurassic palaeoclimate regionalization and evolution of China. Earth Science Frontiers, 24(1): 106~142.
Domingo L, Cuevas-gonzález J, Grimes S T. 2009. Multi reconstruction of the palaeoclimate and palaeoenvironment of the Middle Miocene Somosaguas site (Madrid, Spain) using herbivore dental enamel. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 272(1~2): 53~68.
Fang Xiaosi, Li Peixian, Zhang Zhijun, Cheng Zhengwu, Pang Qiqing, Zhang Zixiong, Huang Baochun. 2008#. Jurassic red beds in central Yunnan. Beijing: Geological Publishing House, 1~111.
Fan Qiushuang, Xia Guoqing, Li Gaojie, Yi Haisheng. 2012&. Analytical Methods and Research Progress of Redox Conditions in the Paleo-Ocean. Acta Sedimentologica Sinica, 40(5): 1151~1171.
Gardner E E, Walker S E, Gardner L I. 2016. Earth-Science Reviews Palaeoclimate, environmental factors, and bird body size: A multivariable analysis of avian fossil preservation. Earth Science Reviews, 162: 177~197.
Hu Haiqian. 2016&. Taphonomic Analysis of Dinosaur Footprints and Fossils of Lower Jurassic Lufeng Formation in Lufeng, Yunnan. Tutor: Zhang Jianping. Beijing: Master Degree Thesis of China University of Geosciences (Beijing): 1~59.
Hu Xiumian, Li Juan, Han Zhong, Li Yongxiang. 2020#. Two types of hyperthermal events in the Mesozoic—Cenozoic: Environmental impacts, biotic effects, and driving mechanisms. Science China: Earth Sciences, 50(8): 1023~1043.
Huang Baochun, Li Yongan, Fang Xiaosi, Sun Dongjiang, Pang Qiqing, Cheng Zhengwu, Li Peixian. 2005&. Magnetostratigraphy of the Jurassic in Lufeng, central Yunnan. Geological Bulletin og China, 24(4): 322~328.
Jianghai Yang, P. A. C. Y. 2016. Reconstructing Early Permian tropical climates from chemical weathering indices. Geological Society of America Bulletin, 128(5~6): 739~751.
Li Delu. 2018&. The Geochemical Characteristics and Paleo-environment Reconstruction of Triassic Chang 7 Oil Shale in the South of Ordos Basin. Tutor: Li Rongxi. Xi'an: Ph. D. dissertation of Chang'an University: 1~98.
Liang Wenjun, Xiao Chuantao, Xiao Kai, Lin Wan. 2015&. The relationship of Late Jurassic paleoenvironment and paleoclimate with geochemical elements in Amdo Country of northern Tibet. Geology in China, 42(4): 1079~1091.
Lerman A. 1989. Lakes Chemistry and Geology Physics. Beijing: Geological Publishing House, 1~318.
McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation. The Journal of Geology, 101(2): 295~303.
Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 299(5885): 715~717.
Noto C R and Grossman A. 2010. Broad-scale patterns of late jurassic paleoecology. Plos One, 5(9): 1~11.
Shao Lei, Liu Zhiwei, Zhu Weilin. 2000&. Application of sedimentary geochemistry of Terrigenous clastic rock to Basin Analysis. Earth Science Frontiers, 7(3): 297~304.
Shen Huan. 2021&. Jurassic Global Climatic Paleogeographic Evolution and Its Implications for Dinosaur Fossil Distribution. Tutor: Wang Chengshan. Beijing: Ph. D. dissertation of China University of Geosciences (Beijing): 1~161.
Sun Liguang, Xie Zhouqing, Zhao Junlin. 2000&. The Characteristics of Sr/Ba and B/Ga Ratios in Lake Sediments on the Ardley Peninsula, Maritime Antarctic. Marine Geology & Quaternary Geology, 20(4): 43~46.
Wang Huanling. 2021&. Carbon and Oxygen Isotopic Characteristics and Paleoenvironmental Significance of Majiagou Formation CarbonateRocks, Ordos Basin. Tutor: Li Qi, Liu Xinshe. Beijing: Master Degree Thesis of China University of Geosciences (Beijing): 1~61.
Wang Yaming. 2017&. Study on Basal Sauropodomorph Dinosaurs from the Early Jurassic Lufeng Basin of Yunnan. Tutor: Wang Xunlian. Beijing: Ph. D. dissertation of China University of Geosciences (Beijing): 1~216.
Xu Zhongjie, Cheng Rihui, Zhang Li, Wang Liaoliang, Kong Yuan. 2012&. The geochemistry records of sea-level relative movement and paleoclimatic evolution of the South China continental margin in Late Triassic—Early—Middle Jurassic. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 37(1): 113~124.
Yang Zhongjian. 1951#. Lufeng sauropod fauna. Paleontology of China, new species C. Beijing: Science Press: 1~94.
Young H W N M, 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. The Journal of Geology, 97(2): 129~147.
Yu Haitian, Xu Zhongjie, Cheng Rihui, Wang Liaoliang, Gao Dan, Hu Xiaoqiang, Zhang Zhen. 2021&. Paleoclimate evolution and elemental geochemical response during Middle Jurassic-Early Cretaceous in tectonic regimetransition period in the north Yellow Sea Basin. Earth Science, 46(3): 1100~1118.

Zhang Tianfu, Sun Lixin, Zhang Yun, Cheng Yinhang, Li Yanfeng, Ma Hailin, Lu Chao, Yang Cai, Guo Genwan. 2016&. Geochemical characteristics of the Jurassic Yun'an and Zhiluo Formations in the northern margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications. Acta Geologica Sinica, 90(12): 3454~3472.

Zhang Xiulian. 1985&. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater. Acta Sedimentologica Sinica, 3(4):17~30.

Geochemical analysis of climatic and environmental changes in Early—Middle Jurassic continental strata

——A case study of the Laowencun section in Chuanjie Basin, central Yunnan

ZHANG Yaotang[1, 2), WANG Wanneng[1, 2), ZHAO Jianbo[1, 2), YUAN Yongsheng[1, 2), LI Suoming[1, 2), ZHANG Honghui[1, 2), ZHENG Hongfu[1, 2), LI Jinwang[1, 2)

1) *Kunming General Survey of Natural Resources Center of China Geological Survey*, *Kunming*, 650100;

2) *Technology Innovation Center for Natural Ecosystem Carbon Sink*, *Ministry of Natural Resources*, *Kunming*, 650100

Objectives: The Jurassic greenhouse climate is an important climate warming event since Mesozoic. The global research on this event mainly focuses on marine strata, but less on continental strata. The Jurassic strata have been deposited in Chuanjie Basin in Lufeng, central Yunnan, which provides a good carrier for studying the Jurassic greenhouse climate environment.

Methods: The research object of this work is another fully exposed section newly discovered of the Early and Middle Jurassic in the Chuanjie Basin, sampling and analysis of petrogeochemistry, trace elements, etc, the sedimentary facies have been redefined, build the chemical stratigraphic framework of the upper section of the Lufeng—Chuanjie Formation through the longitudinal variation of *CIA* , B/Ga, U/Th, Sr/Cu , etc. of fine clastic rock samples.

Results: Through petro- and trace element geochemical signatures we systematically restored the climate change characteristics of the Chuanjie Basin in the Early and Middle Jurassic, which can be divided into three periods: warm humid—hot dry alternation period in the early and middle Early Jurassic, hot dry period with frequent extreme weather (extreme drought, rainstorm) in the late Early Jurassic (similar to the current tropical grassland climate), and climate stability period in the early Middle Jurassic, identified the response of the T—OAE event in the basin in the upper Lufeng Formation, manifested as the increases of proportion of dark purple red mudstone, extensive development of dolostone, argillaceous dolostone, dolomitic mudstone, and paleosol, significantly reduced supply of sandstone and coarse debris clarified its impact on the mass extinction and rapid burial of dinosaurs, find the culprits are extreme drought, water shortage and short-term rainstorm, and filled the gap in previous research.

Conclusions: Based on the study of Jurassic dinosaur burial horizon in central Yunnan, it is found that the abrupt change horizon of climate environment in the late Early Jurassic is equivalent to this horizon, and the sedimentary and geochemical characteristics show that the cluster burial of dinosaurs is closely related to this event.

Keywords: Chuanjie Basin; Lufeng Formation; Chuanjie Formation; paleoenvironment

Acknowledgements: This paper is supported by the Geological Survey Project of China Geological Survey (No. DD20220987)

First author: ZHANG Yaotang, born in 1991, engineer, is mainly engaged in regional geological and mineral survey; Email: 1585413443@qq.com

Corresponding author: WANG Wanneng, born in 1995, engineer, is mainly engaged in regional geological survey; Email: 1922637474@qq.com

Manuscript received on: 2023-12-20; Accepted on: 2024-04-09; Published online on: 2024-06-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.06.052 **Edited by**: LI Ming, ZHANG Yuxu