陆相断陷湖盆源–汇体系重构与控砂机制研究：以珠江口盆地文昌凹陷文一段为例

陈岳，张建新，王力，徐守立，朱沛苑，张道军*

中海石油（中国）有限公司湛江分公司，广东 湛江，524057

第一作者，E-mail：chenyue10@cnooc.com.cn

* 通信作者，E-mail：zhangdaojun@cnooc.com.cn

2025-02-25 收稿；2025-04-01 修回；2025-04-08 接受

基金项目：中国海洋石油有限公司科研项目（KJZH-2024-2106）

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)04-0273-15　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250087

摘　要：陆相断陷湖盆由于受构造、气候、水深等复杂因素控制，其源–汇体系定量重构及控砂、沉积过程恢复成为了制约进一步开展沉积研究的难题。以珠江口盆地西部文昌凹陷文昌组一段为研究对象，通过物源区岩性与地貌恢复、搬运古沟谷刻画、断层边界样式的识别及沉积体类型、规模的厘定等研究对源–汇体系关键要素进行定量描述，并探讨各要素之间的耦合关系。研究结果表明：文昌组一段沉积期盆内以扇三角洲、辫状河三角洲、滨–浅湖沉积为主，其物源区基岩类型主要为岩浆岩与沉积岩，发育 7 个物源体系，存在 4 种源–汇体系控砂机制，共识别出 37 条古沟谷，陡坡带沉积砂体与集水高差、汇水面积、沟谷横截面积参数最密切，缓坡带则与汇水面积、沟谷长度、沟谷横截面积相关性最强。本研究可为陆相断陷湖盆沉积体系描述提供依据。

关键词：断陷湖盆；源–汇体系；定量化分析；控砂机制；文昌凹陷；珠江口盆地

自剥蚀区形成的沉积物经运输通道搬运至沉积区沉积的整个过程被称之为“源–汇体系”[1]。自该概念提出后，相关理论很快被运用于沉积学研究之中，通过源–汇体系各要素耦合寻找砂体也成为了目前中深层油气勘探的重点研究方向之一，在我国近海盆地含油气凹陷如渤中凹陷、西湖凹陷、惠州凹陷勘探实践中发挥了重要作用[2-4]。近年来，对源–汇体系的研究由传统的阐述、定性研究逐渐发展到应用、定量研究[5-6]，通过重构源–汇体系并建立剥蚀–搬运–沉积整个过程的定量响应关系，从而明确物源供源能力及沉积物优势卸载方向，提高了沉积体系研究的准确率[7]。然而，中深层陆相断陷湖盆由于长期受构造运动、气候、水深等诸多因素控制，存在物源区保存不完整、边界条件复杂多样、地层记录信息有限等问题，成为对其开展源–汇体系重构面临的主要挑战。

文昌凹陷是珠江口盆地西部珠三坳陷内已被证实的富生烃凹陷，目前针对文昌凹陷中深层重要层系文昌组一段（简称“文一段”）的勘探揭示其具有活跃的油气显示，展现了可观的油气资源潜力[8]，但对该层系源–汇类型与演化规律、沉积砂体展布特征仍认识不清，严重制约了该区域勘探进程。针对上述问题，本研究在源–汇体系理论的指导下，以文昌凹陷及围区为研究区，结合测录井、岩壁心、三维地震等基础资料，开展文一段源–汇体系重构，并对各要素进行定量分析，系统解析要素之间耦合关系，综合构建文昌凹陷古近系源–汇体系类型，并据此阐明各源–汇体系控砂模式，揭示砂体分布规律，为下步油气勘探部署提供理论支撑。

著录信息：陈岳，张建新，王力，等. 陆相断陷湖盆源–汇体系重构与控砂机制研究：以珠江口盆地文昌凹陷文一段为例［J］. 地质科技通报，2025，44(4)：273-287.
CHEN Yue，ZHANG Jianxin，WANG Li，et al. Reconstruction of source-sink system and sand control mechanisms in continental faulted lake basins: A case study of the First Member of the Wenchang Formation in the Wenchang Sag of the Pearl River Mouth Basin［J］. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(4)：273-287.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

1　区域地质概况

珠江口盆地是南海西北陆缘在燕山期花岗岩及前古近系褶皱基底之上发育的以新生代沉积为主的大型沉积盆地(图 1a),其西部以珠三坳陷为主体。文昌凹陷为珠三坳陷内次级构造单元,北接阳春凸起,东南邻神狐隆起,整体呈 NE 向展布,包括文昌 A 凹陷、文昌 B 凹陷、文昌 C 凹陷及相邻的琼海低凸起、阳江低凸起等正向构造单元,面积近 9 000 km^2(图 1b)。平面上,凹陷具“南断北超”箕状断陷盆地特征,按构造特征可分为南部陡坡带、中部深洼及北部缓坡带。垂向上,凹陷历经断陷期、断坳转换期与坳陷期,形成了典型的“下断上坳”半地堑结构[9-10]。

在神狐运动、珠琼运动、南海运动、东沙运动等构造活动影响下,研究区自下而上依次接受(图 1c)神狐组(T100-T90)、文昌组(T90-T80)、恩平组(T80-T70)、珠海组(T70-T60)、珠江组(T60-T40)、韩江组(T40-T20)、粤海组(T20-T10)、万山组(T10-T05)与第四系沉积(T05 至今)。古近系文昌组为珠琼运动Ⅰ幕沉积地层,沉积于凹陷演化断陷阶段,其内部又可识别出两个层序界面(T81、T82)并划分为 3 个四级层序,本研究目的层系文一段(T80-T81)位于上部,为滨、浅湖陆相沉积,沉积期文昌凹陷水深较浅,钻井揭示岩性以含砾不等粒砂岩、不等粒砂岩、砂岩夹褐灰色泥岩为主。珠琼运动Ⅰ幕末期,太平洋板块与欧亚板块汇聚速率上升,板块间应力调整为挤压状态[11-12],文昌凹陷抬升剥蚀,凹陷边缘可见指示暴露氧化环境的红色泥岩。

2　文昌凹陷源–汇体系重构

源–汇体系关键要素包括源(物源体系)、渠(输

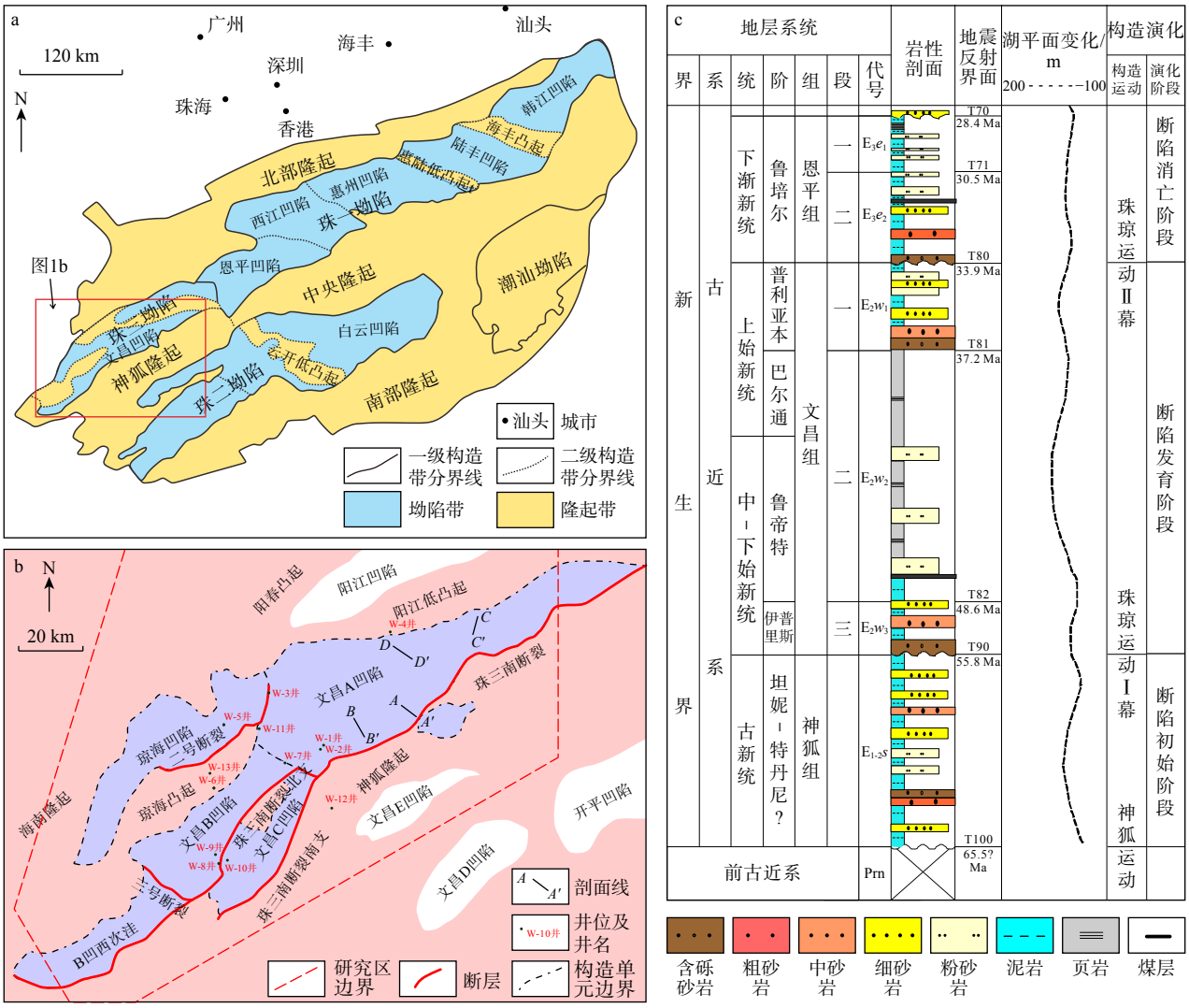


图 1　文昌凹陷区域位置 (a) 和构造单元划分 (b) 及古近系地层综合柱状图 (c)

Fig. 1　Location (a), tectonic units (b) and stratigraphic columnar section (c) of Wenchang Sag

砂体系)、汇(沉积体系)。下面对各要素特征进行分析，并在此基础上开展定量–半定量表征，从而完成文昌凹陷文一段源–汇体系重构。

2.1 物源体系

物源决定沉积体系能否发育，是源–汇体系的根本要素。母岩类型、物源方向、古地貌形态等参数对湖盆内沉积体系有重要影响[13-14]。

2.1.1 物源判识

对研究区物源体系范围、主要供源方向的判识对于重建沉积物沉积路径至关重要。在井密度适中、分析化验数据较充足区域，利用重矿物组合特征及含量变化开展物源区划分、母岩类型恢复、物源示踪等研究，对于少井区域，则通过地震前积体最大前积角度对物源方向进行判别[15-16]。

重矿物自身具有稳定性，受风化、搬运和成岩作用影响较少，且对物源体系的变化较为敏感，即来自同一物源体系的沉积物重矿物组合特征往往相同[17-19]。本研究对凹陷内 8 口钻遇文一段探井重矿物样品进行了统计分析(图 2)，结果表明，文一段沉积期，凹陷南部神狐隆起、北部阳春凸起与凹陷内琼海凸起均可供源，神狐隆起物源砂岩见锆石+赤褐铁矿+白钛矿优势重矿物组合，阳春凸起物源砂岩以锆石+赤褐铁矿组合为特征，琼海凸起物源砂岩则以锆石+白钛矿为重矿物组合特征。自隆起、凸起物源区向凹陷中心方向，不稳定矿物含量随之递减，*ZTR* 指数(稳定矿物锆石+电气石+金红石比例)不断升高，反映沉积物逐渐远离母岩区的搬运过程，其反方向即指示物源方向。

重矿物通常是母岩中的副矿物，蕴藏了沉积物的母岩类型等信息。锆石、电气石、角闪石、金红石、锐钛矿、黑云母等矿物反映母岩类型为岩浆岩，石榴石、帘石、绿泥石等反映母岩类型为变质岩，白钛矿则通常来自沉积岩母岩区。各物源砂岩母岩类型均以岩浆岩为主(图 2)，这也与隆起、凸起之上探井所揭示的基底岩性相符。以 W-12 井、W-13 井为例，W-12 井基底为花岗岩，其石英质量分数 51%，呈不规则它形晶，斜长石质量分数 15%，钾长石质量分数 32%，亦见少量黑云母；W-13 井基底为流纹岩，斑晶为石英、钾长石，基质为长英质成分，具霏细结构、流纹构造。沉积岩类型母岩对砂体的贡献则可能与

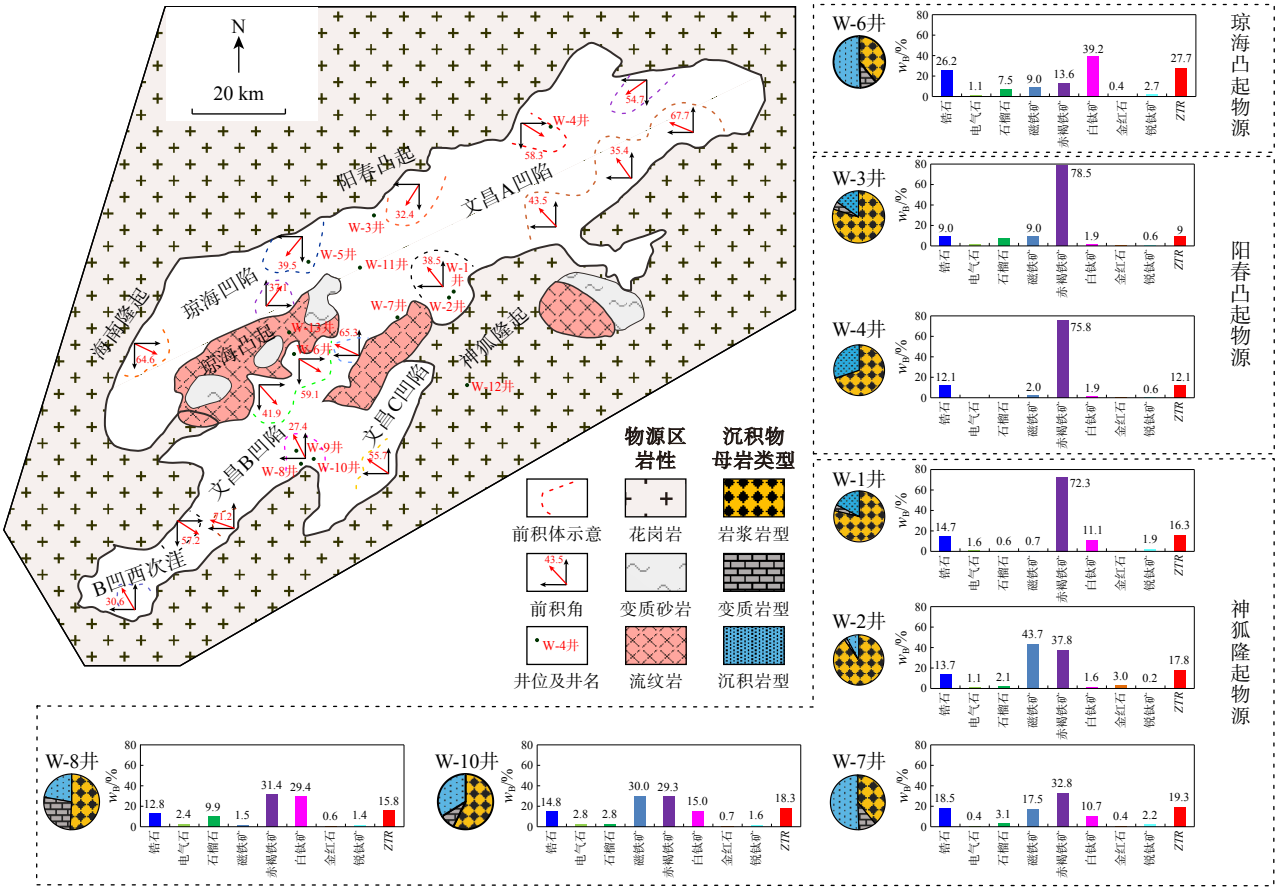


图 2 文昌凹陷文一段砂岩重矿物、母岩类型特征与前积体最大前积角平面分布(*ZTR*. 稳定矿物锆石+电气石+金红石比例)

Fig. 2 Integration of heavy mineral signatures, provenance rock types and planar distribution of maximum progradation angles in prograding bodies of sand stone in the First Member of Wenchang Formation in Wenchang Sag

文一段沉积末期地层抬升后先存沉积地层剥蚀供源有关。不同的母岩类型往往具有不同的抗风化剥蚀能力，前人[20]研究已揭示，火成岩、沉积岩中长石等不稳定组分含量相对较高，抗风化能力弱，易于剥蚀形成碎屑颗粒，供源能力较强，有利于大型沉积体的形成。

地震前积反射与各沉积体系存在良好的匹配关系，代表了沉积物从源区向凹陷中心不断推进的过程，也可以很好地佐证物源方向[21]。地震前积体在不同测线前积角大小不等，张金伟等[22]提出先求取前积体在纵测线上前积角 θ_1、在横测线上前积角 θ_2，根据空间关系计算得到前积体最大前积方位与纵侧线夹角 θ=arctg(ctgθ_1/ctgθ_2)。运用上述方法对文昌凹陷各前积体物源方向与平面展布进行了定量刻画(图 2)，主物源方向截然不同的前积体分属于不同的物源区，神狐隆起物源区主物源方向为 SE 向，海南隆起物源区主物源方向为 NW 向，阳春凸起物源区主物源方向为 NE 向，偶见 NW-NNW 向物源前积，琼海凸起物源区前积体由凸起向琼海凹陷、文昌 B 凹陷各方向发散推进。

2.1.2　古地貌恢复

古地貌是控制沉积体系发育与分布的重要因素。古隆起、古凸起等正向构造单元一般长期受剥蚀，能够稳定向盆内供源，古沟谷、古斜坡可作为沉积物搬运通道，洼陷区则为沉积物卸载区。古地貌能够指示物源区位置、形态与主要物源方向。本研究基于地层厚度法进行沉积区地貌恢复，即根据地层残余厚度，逐步回剥、去压实校正至原始沉积厚度，最后基于地层厚度由厚减薄，相应地貌由低变高的原理恢复凹陷文一段原始沉积地貌[23]。已被后期抬升剥蚀的沉积区地貌，采用地层厚度趋势法加以恢复，即假定源区剥蚀前地层厚度均一或变化均匀，根据地层减薄趋势合理外延获取剥蚀地层厚度。对于物源区古地貌，则在现今基底形态基础之上，将剥蚀的地层体积回填至推测源区加以恢复[24-26]。

古地貌恢复结果(图 3)表明，文昌组沉积于凹陷

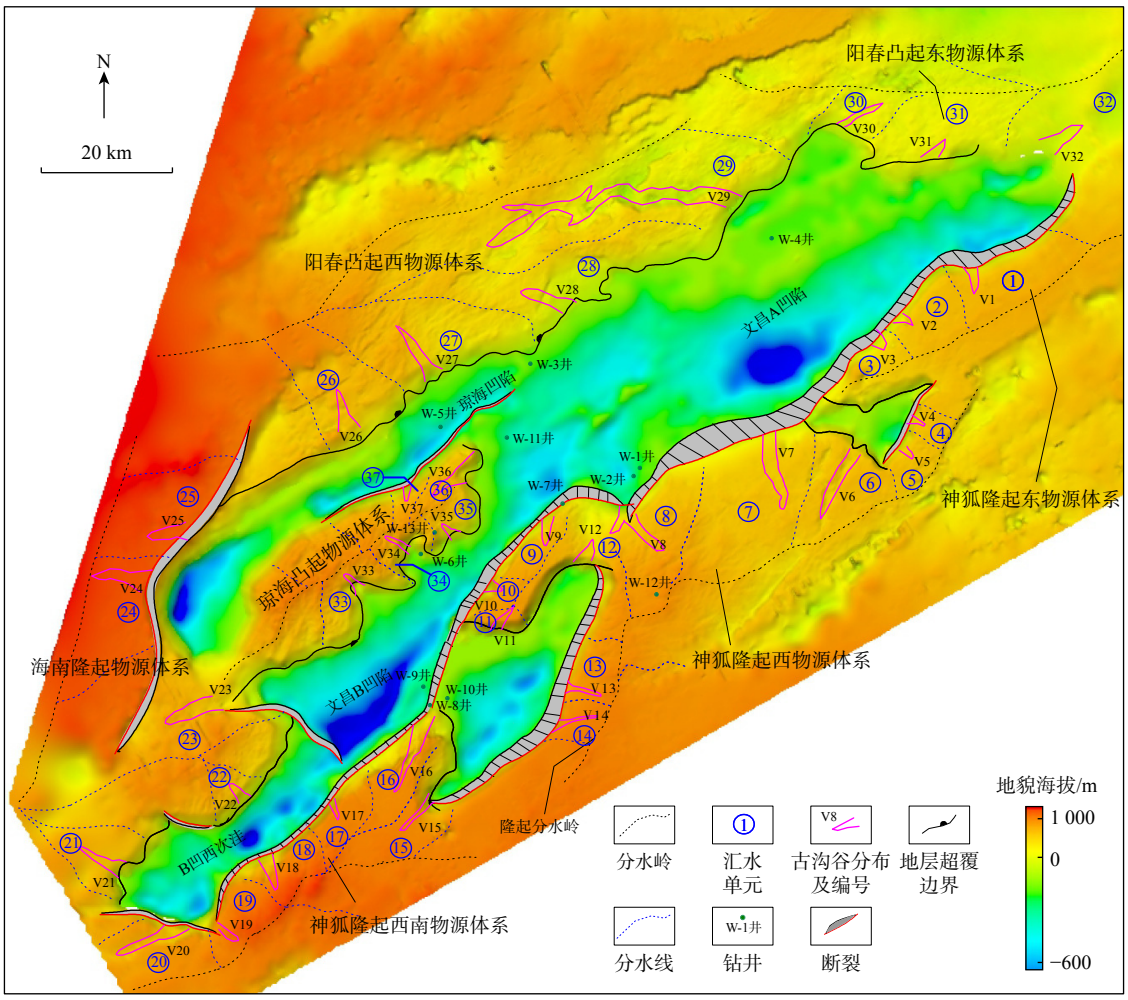


图 3　文昌凹陷文一段古地貌恢复

Fig. 3　Paleogeomorphological reconstruction of the First Member of Wenchang Formation in the Wenchang Sag

初始裂陷期，文一段沉积范围约 3 770 km^2，此时在珠三南断裂、二号断裂等 NE 向大断裂差异活动的控制下，文昌 A 凹陷、文昌 B 凹陷、文昌 B 凹陷西次洼、文昌 C 凹陷、琼海凹陷与凹陷内部琼海凸起均已初步成型，形成南陡北缓，多个箕状断陷湖盆分割的隆洼相间古地理沉积格局。南部陡坡带在珠三南断裂控制下形成东西 2 个沉降中心，凹陷西北部受次级断层影响，于断层下降盘形成另一个主要沉降中心。

2.1.3　源区定量表征

在古地貌基础上，开展物源体系的精细识别与划分。物源区顶面在差异剥蚀作用下，形成了一系列高点和沟谷，根据神狐隆起、阳春凸起及凹陷内琼海凸起等正向单元上的地貌高点及坡向变化，将最高点连线作为分水岭，并进一步沿着近垂直于分水岭方向将次级高点连线识别为分水线[27-28]。以分水岭作为划分依据，文昌凹陷文一段沉积期可进一步细分为七大物源体系（图 3）：①神狐隆起东物源体系；②神狐隆起西物源体系；③神狐隆起西南物源体系；④海南隆起物源体系；⑤阳春凸起西物源体系；⑥阳春凸起东物源体系；⑦琼海凸起物源体系。不同物源体系内，根据分水线、地形坡度、构造样式等差异进一步划分为若干汇水单元。

将各汇水单元区域面积、集水高差等参数进行定量化表征（表 1），缓坡带阳春凸起东、西物源体系拥有较大的流域汇水面积，平均超 130 km^2，指示较高的古水流量，有利于沉积物的供给；陡坡带神狐隆起东、西、西南物源体系与海南隆起物源体系集水高差普遍大于 1 000 m，使沉积物具有较高势能，是沉积物大规模搬运的核心驱动力。琼海凸起物源体系汇水面积较局限，平均仅 20.5 km^2，陡坡带集水高差约 940 m，缓坡带平均高差 821 m，小于神狐隆起，略大于阳春凸起，反映相对较弱的供源能力。

2.2　输砂体系

在确定物源区的基础上，通过源区等值线的形态识别出古沟谷体系，并根据地震资料对其形态进行了刻画。古沟谷是基准面下降至坡折带之下后地表长期受侵蚀所形成的负向地貌单元，也是源区向凹陷内搬运沉积物的输砂通道，在地震剖面上表现为底界面连续强振幅下凹，内部充填双向下超或杂乱空白反射[29-30]。文昌凹陷文一段沉积期存在 37 条规模不等的古沟谷，分别命名为 V1-V37（图 3），外部形态见“V”型、“U”型、“W”型样式（图 4），“V”型沟谷宽深比较小，谷坡陡，谷底窄，指示水流流速大，沉积物下切侵蚀作用较强；“U”型沟谷宽深比较大，两侧谷肩较平缓，反映沉积物以侧蚀、堆积作用为主，下蚀作用较弱；“W”型沟谷为晚期沟谷分叉形成的复合型沟谷，为水动力减弱后形成，通常携带细粒沉积物。沉积物自古沟谷经凹陷边界进入湖盆，边界坡度越陡，往往沉积物搬运势能越大。

对古沟谷进行定量表征，包括统计古沟谷的延伸长度、宽度、深度、截面面积、宽深比与各沟谷边界坡度等参数（表 1）。神狐隆起东物源体系沟谷（V1-V3）平均长 2.6 km，宽 1.4 km，深 305 m，横截面积 0.39 km^2，宽深比 8.7，见“V-W”型沟谷形态，边界坡度 43°。神狐隆起西物源体系 V4-V14 沟谷平均长 5.0 km，宽 2.2 km，横截面积 0.41 km^2，深度 353 m，宽深比 6.5，以“V”型形态为主，在文昌 A 凹陷边界坡度 27.9°，文昌 B 凹陷边界坡度 42.2°，文昌 C 凹陷边界坡度 42.3°。神狐隆起西南物源体系 V15-V20 沟谷平均长 5.6 km，宽 1.5 km，深 339 m，横截面积 0.29 km^2，宽深比 4.7，形态多呈“V”型，边界坡度 38.6°。海南隆起物源体系 V21-V25 沟谷平均长 6.3 km，宽 2.3 km，深 357 m，横截面积 0.41 km^2，宽深比 6.5，形态也主要呈“V”型，缓坡坡度 16.2°，陡坡坡度 37.1°。阳春凸起西物源体系 V26-V29 沟谷规模最大，平均长 9.4 km，V29 沟谷甚至长达 17.8 km，宽 4.6 km，深 450 m，横截面积 1.1 km^2，宽深比 10.4，见“U-W”型形态，边界坡度 11.8°。阳春凸起东物源体系 V30-V32 沟谷平均长度 5.3 km，宽度 3.6 km，深度 434 m，横截面积 0.81 km^2，以“U-W”型沟谷为主，宽深比 8.5，边界坡度 9.4°。琼海凸起物源体系缓坡 V33-V36 沟谷平均长 3.5 km，宽 2.1 km，深 301 m，横截面积 0.34 km^2，宽深比 7.5，“V-W”型形态均有发育，边界坡度 13.4°；陡坡 V37 沟谷长 1.9 km，宽 2.0 km，深 404 m，横截面积 0.40 km^2，宽深比 4.9，呈“V”型形态，边界坡度 25.6°。综上所述，凹陷陡坡带边界坡度均大于 20°，多见“V”型沟谷，偶见复合“W”型沟谷，缓坡带边界坡度均小于 20°，以发育“U-W”型沟谷为主。

2.3　沉积体系

沉积体系是源区演化控制下物源供给、物质搬运及分配的综合响应[31]。在前文分析的基础上，通过岩电组合特征、粒度特征、地震反射特征等对古近系沉积体系类型及规模进行了识别，明确文昌凹陷文一段发育扇三角洲、辫状河三角洲、湖泊 3 种沉积相类型（图 5，典型地震相特征剖面位置见图 1b），

表 1　文昌凹陷文一段源–汇体系要素分析

Table 1　Elements of the source-sink system in the First Member of Wenchang Formation, Wenchang Sag

物源体系	源				渠							边		汇					
	母岩岩性	汇水单元	汇水面积/km^2	集水高差/m	古沟谷编号	截面积/km^2	长度/km	宽度/m	深度/m	宽深比	形态	边界样式	断裂角度/(°)	相带类型	展布形态	面积/km^2	厚度/m	砂体体积/km^3	延伸距离/km
神狐隆起东物源体系	花岗岩	①	44.1	1 169	V1	0.66	2.9	2894	457	6.3	V型	陡坡	43.0	扇三角洲	扇形	45.6	818	37.3	3.9
		②	26.8	1 090	V2	0.28	2.3	2216	249	8.9	W型	陡坡		扇三角洲	扇形	57.9	967	56.0	6.1
		③	28.6	1 201	V3	0.24	2.5	2279	208	11.0	W型	陡坡							
神狐隆起西物源体系	花岗岩为主，兼有流纹岩、变质砂岩	④	31.3	967	V4	0.16	1.9	1391	232	6.0	V型	陡坡	27.9	扇三角洲	扇形	47.2	257	12.1	3.6
		⑤	34.1	959	V5	0.26	2.5	1887	272	6.9	V型	陡坡							
		⑥	54.4	875	V6	0.33	8.9	2085	312	6.7	V型	陡坡							
		⑦	150.5	1 386	V7	0.56	9.7	2739	407	6.7	V型	陡坡	27.9			95.2	623	59.3	9.3
		⑧	125.3	1 429	V8	0.39	7.1	2010	387	5.2	V型	陡坡				113.7	525	59.7	10.9
		⑨	24.0	1 263	V9	0.46	3.4	2932	311	9.4	U型	陡坡	42.2			27.0	901	24.3	3.9
		⑩	12.5	1 027	V10	0.26	1.7	1921	272	7.1	V型	陡坡				8.9	501	4.5	1.7
		⑪	67.1	1 477	V11	0.73	5.9	2703	537	5.0	V型	陡坡	42.3			89.8	490	44.0	9.5
		⑫	28.1	988	V12	0.32	3.7	2080	306	6.8	V型	陡坡				35.9	254	9.1	6.0
		⑬	40.6	1 569	V13	0.56	4.5	2376	471	5.0	V型	陡坡				49.3	653	32.2	5.5
		⑭	42.0	1 544	V14	0.45	5.5	2380	380	6.3	V型	陡坡				30.1	637	19.2	10.1
神狐隆起西南物源体系	花岗岩	⑮	55.2	1 544	V15	0.20	5.5	1612	252	6.4	V型	陡坡	38.6	扇三角洲	扇形	33.1	541	17.9	10.1
		⑯	77.5	1 361	V16	0.62	9.2	2268	546	4.2	W型	陡坡				75.6	461	34.9	5.6
		⑰	31.7	1 049	V17	0.26	3.1	1491	351	4.2	V型	陡坡				19.9	958	19.1	3.3
		⑱	38.4	1 098	V18	0.23	4.7	1354	342	4.0	V型	陡坡				16.7	706	11.8	3.9
		⑲	20.7	1 205	V19	0.15	2.5	982	210	4.7	V型	陡坡				4.2	710	3.0	1.8
		⑳	132.4	1 286	V20	0.25	8.7	1477	333	4.4	V型	陡坡				22.1	912	20.2	3.8

续表

物源体系	源				渠							边		汇					
	母岩岩性	汇水单元	汇水面积/km^2	集水高差/m	古沟谷编号	截面积/km^2	长度/km	宽度/m	深度/m	宽深比	形态	边界样式	断裂角度/(°)	相带类型	展布形态	面积/km^2	厚度/m	砂体体积/km^3	延伸距离/km
海南隆起物源体系	花岗岩	㉑	91.4	1371	V21	0.49	6.2	2830	346	8.2	W型	缓坡	16.2	辫状河三角洲	舌形	45.9	419	19.2	7.2
		㉒	40.3	1422	V22	0.42	3.5	2353	359	6.6	V型	缓坡				37.1	320	11.9	5.8
		㉓	118.8	1585	V23	0.28	9.3	2015	276	7.3	V型	缓坡				86.5	412	35.6	13.9
		㉔	210.4	1665	V24	0.52	6.7	2266	455	5.0	V型	陡坡	37.1	扇三角洲	扇形	196.5	510	100.2	7.8
		㉕	136.2	1591	V25	0.35	5.9	1998	350	5.7	V型	陡坡							
阳春凸起西物源体系	花岗岩	㉖	102.3	722	V26	0.88	6.6	4276	412	10.4	U型	缓坡	11.8	辫状河三角洲	舌形	72.9	290	21.1	7.5
		㉗	100.1	638	V27	0.83	6.3	4071	406	10.0	U型	缓坡				66.5	325	21.6	7.0
		㉘	118.3	427	V28	1.03	6.8	5118	402	12.7	W型	缓坡				116.6	375	43.7	11.2
		㉙	303.4	571	V29	1.44	17.8	4981	580	8.6	U型	缓坡				197.3	195	38.5	13.7
阳春凸起东物源体系	花岗岩	㉚	61.9	375	V30	0.51	5.9	3101	326	9.5	W型	缓坡	9.4	辫状河三角洲	舌形	42.2	229	9.7	7.8
		㉛	151.1	293	V31	0.99	3.9	4051	491	8.3	U型	缓坡				146.4	255	37.3	14.9
		㉜	104.6	759	V32	0.92	6.2	3767	486	7.8	W型	缓坡				98.6	379	37.4	9.5
琼海凸起物源体系	流纹岩为主，兼有变质砂岩	㉝	19.4	861	V33	0.43	2.1	2470	352	7.0	W型	缓坡	13.4	扇三角洲	扇形	35.1	225	7.9	7.1
		㉞	14.9	810	V34	0.14	3.4	1688	164	10.3	U型	缓坡			扇形	69.7	216	15.1	8.1
		㉟	13.8	793	V35	0.14	2.3	1423	192	7.4	W型	缓坡							
		㊱	41.3	941	V36	0.69	6.3	2761	499	5.5	V型	缓坡			扇形	109.5	326	35.7	11.7
		㊲	12.9	1198	V37	0.40	1.9	1993	404	4.9	V型	陡坡	25.6	扇三角洲	扇形	17.5	692	12.1	3.5

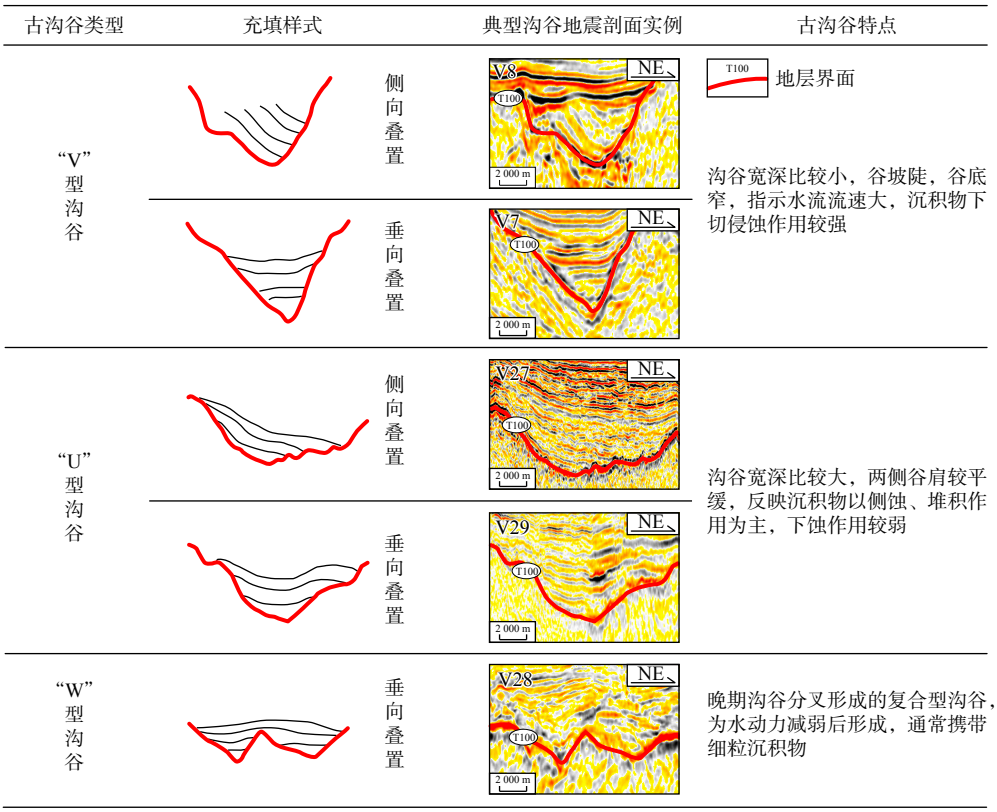


图 4　文昌凹陷文一段古沟谷类型与充填样式

Fig. 4　Types and filling patterns of paleovalleys of the First Member of Wenchang Formation in the Wenchang Sag

并进一步划分成若干沉积亚相。受沉积期基准面的多次升降旋回变化影响，扇三角洲前缘及辫状河三角洲前缘亚相最为发育，是沉积体系的主体。

扇三角洲广泛发育于陡坡带与琼海凸起，由冲积扇直接入湖形成，外形近楔状，平面上呈扇形展布，地震剖面上为高角度楔状前积体，可进一步划分为平原、前缘亚相[32-33]。平原亚相是扇三角洲的水上部分，在研究区分布范围狭窄，向湖快速过渡至水下沉积，地震反射表现为中–强振幅中–高频断续杂乱反射，测井曲线响应特征为中–高幅齿化箱型、钟型，W-6 井、W-7 井、W-8 井等岩性以灰色含砾粗砂岩、中–粗砂岩夹灰色、褐色、红色泥岩为主，杂色泥岩反映沉积物长期暴露于氧化环境，也是平原亚相最为显著的识别依据[34]。多套水道含砾砂岩叠置，厚度可达 10 m 以上，垂向见正粒序，砂岩成熟度低，岩屑、长石含量较高，分选差，以棱角状–次棱角状为主，粒度概率累计曲线呈宽缓上拱式特征，反映以重力流为主的水动力环境。前缘亚相是扇体进入水体后快速沉积产物，展布范围广泛，地震反射以中–弱振幅中频中等连续斜交前积特征为主，测井曲线见齿化钟型、指型特征，W-1 井、W-2 井、W-9 井等岩性为灰色中–细砂岩与灰色泥岩不等厚互层，以正粒序水道砂体为主，厚度较平原水道显著减薄，多为 3 ~ 5 m，偶见 1 ~ 2 m 薄层反粒序细砂岩河口坝沉积。砂岩成熟度较高，分选磨圆程度显著变好，粒度概率累计曲线呈中–低斜率两段式特征，反映沉积物粒度较细，以重力流特征为主，亦见牵引流特征。河口坝砂体岩性更细，测井曲线呈指型，地震剖面见透镜状中弱振幅高频反射特征[35-36]。

辫状河三角洲集中发育于北部缓坡带，由辫状河进积到稳定水体中形成，相较于扇三角洲接受较多临近高地的物源贡献，辫状河三角洲离物源普遍较远，沉积物经水流长距离搬运而来，平面上呈舌状展布，地震剖面见低角度凸镜状前积体[37-40]。辫状河三角洲平原亚相在已钻井中并未钻遇，推测更靠近物源一侧，地震剖面上见中–强振幅弱连续中–高频反射。前缘亚相发散展布，地震反射呈中等振幅中频中–高连续低角度斜交前积反射特征，测井曲线呈明显齿化钟型，W-4 井、W-5 井等岩性主要为灰色中–细砂岩与灰色泥岩、粉砂岩薄互层，水道砂体厚度 2 ~ 5 m，砂岩成熟度高，以石英为主，分选磨圆好，粒度概率累计曲线见中–高斜率三段式特征，反映典型的牵引流水动力特征。

湖泊相沉积在凹陷内广泛发育，可划分为滨湖

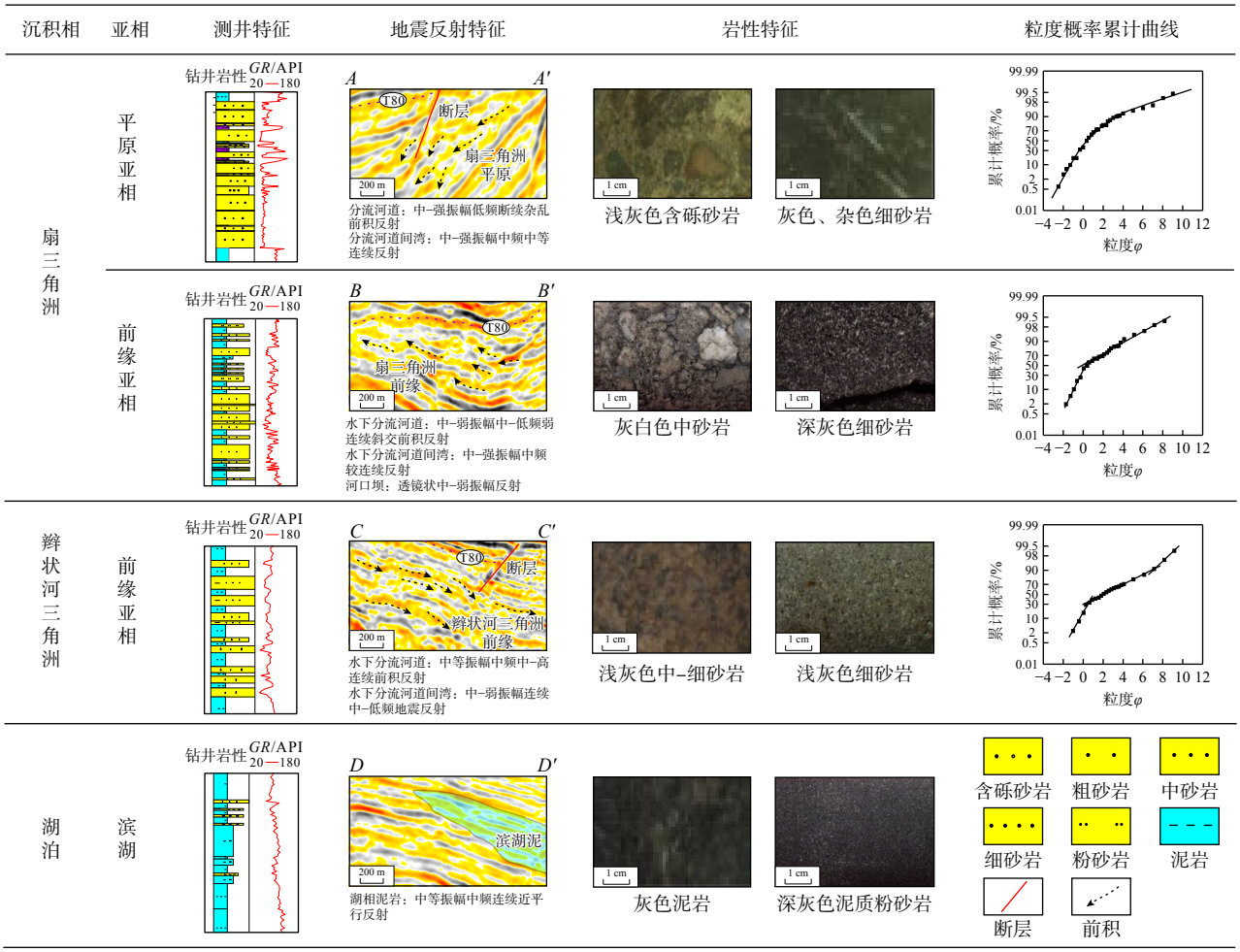


图 5　文昌凹陷文一段沉积相识别图版（剖面位置见图 1）

Fig. 5　Sedimentary facies chart of the First Member of Wenchang Formation in the Wenchang Sag

亚相与浅湖亚相。滨湖亚相距岸较近，沿陡坡区呈条带状展布，沉积物接近水面，枯水期甚至会出露水面，处于低水动力环境[41-42]，沉积物粒度细，W-3 井主要见以暗色泥岩、碳质泥岩为主的滨湖泥，伽马曲线高值平滑，地震剖面见中等振幅中频较连续反射。浅湖水体处于滨湖区的内侧，水体较深，沉积环境较安静，在已钻井中未有揭示，地震剖面上与滨湖亚相存在相变，表现为中–强振幅低频连续近平行反射。

根据建立的岩石相、测井相、地震相与沉积相的对应关系，在平面上对沉积体系进行追踪，完成文一段沉积体系展布刻画（图 6）。整体上，扇三角洲主要发育于同生断层所控制的湖盆边缘陡坡一侧，沉积区底形坡度较大，同相轴与水平同相轴夹角大于 15°，辫状河三角洲则发育于断阶坡折带所控制的缓坡带，沉积区底形坡度小，同相轴与水平同相轴夹角小于 10°。特别地，琼海凸起缓坡带由于源近流短，边界仍具一定坡度，且古地貌集水高差反映其源区山地较陡，沉积物仍以冲积扇形式入湖，表现为扇三角洲沉积响应特征，砂岩成熟度较低，粒度分析为明显重力流沉积。

3　源–汇耦合控砂机制

3.1　源–汇耦合关系研究

由沉积体系分析可见，在不同边界坡度下，沉积体类型与展布特征存在明显不同，需分别阐述陡坡带、缓坡带环境下各要素之间的关系与源–汇体系耦合对沉积砂体的控制作用。以沉积砂体体积与向湖盆延伸距离来表征不同源–汇沉积体系的大小，即砂体体积越大、延伸距离越远，输砂能力越强，沉积体系规模越大。将源区汇水面积、集水高差、沟谷长度、沟谷横截面积、沟谷宽深比与砂体体积、延伸距离进行单因素相关性分析结果可见：在陡坡带与缓坡带，汇水面积、沟谷长度与沟谷横截面积均与沉积体系规模存在较强的正相关关系，其中汇水面积与沉积体系相关性最好。汇水面积越大，沟谷长度越

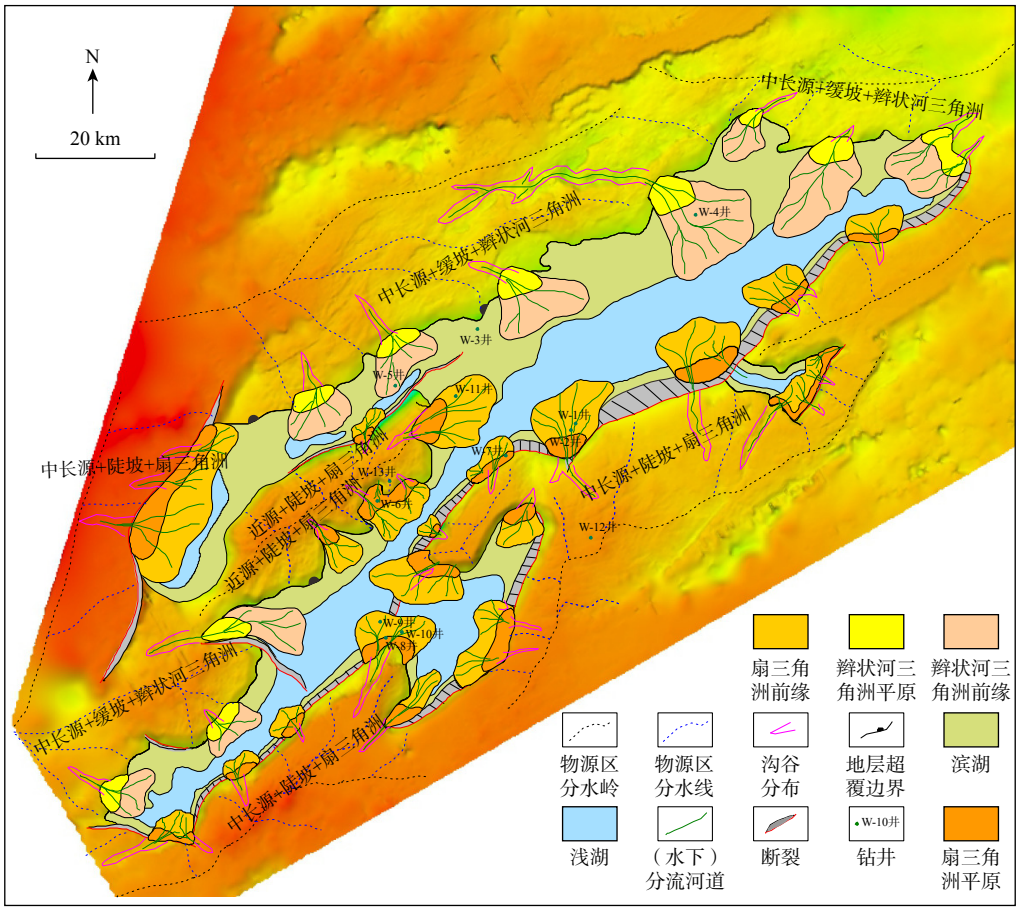


图 6　文昌凹陷文一段沉积体与古地貌叠合

Fig. 6　Superimposition of depositional bodies onto paleogeomorphology of the First Member of Wenchang Formation in the Wenchang Sag

长，物源剥蚀量越大，而沟谷横截面积越大则反映沉积物输送能力越强、输送速率越快，从而沉积体系越为发育。集水高差、沟谷宽深比对沉积体系的影响则存在差异化，在陡坡带，集水高差越大，沉积物搬运势能越高，而宽深比越小，水动力越强，沉积体系越发育；在缓坡带，集水高差与沉积体的规模无明显关系，而与陡坡带相反，沟谷宽深比越大，沉积通量反而越大，输砂能力越强，沉积砂体体积越大，沉积体系越发育。整体上，陡坡带集水高差多大于 1 000 m，宽深比多小于 7，缓坡带则与之相反。

为了明确沉积体系发育的主控因素，利用 Pearson 相关系数对各个变量元素进行整体分析，通过热力图衡量各要素对沉积体系的影响程度(图 7k ~ l)。结果可见，对陡坡带而言，集水高差相关性最强，其次为汇水面积，沟谷横截面积、沟谷长度、沟谷宽深比控制作用依次减弱；对缓坡带，汇水面积作用最大，沟谷长度、沟谷横截面积次之，沟谷宽深比及集水高差对沉积体系的控制作用不明显。进一步分析各要素之间的关系可知，汇水面积、沟谷长度与沟谷横截面积高度正相关，相关系数为 0.72 ~ 0.83，结合陡坡区集水高差大、缓坡区集水高差小的特征，根据源–渠配置关系可将文昌凹陷文一段源–汇体系分为 4 类：①近源陡坡型；②近源缓坡型；③中长源陡坡型；④中长源缓坡型。各物源体系中，神狐隆起东、西、西南物源体系与海南隆起物源体系陡坡带发育中长源陡坡型源–汇体系，阳春凸起东、西物源体系与海南隆起物源体系缓坡带发育中长源缓坡型源–汇体系，琼海凸起之上近源陡坡型、近源缓坡型源–汇体系均发育。

3.2　源–汇耦合控砂机制

基于源–汇体系耦合模式及不同类型源–汇体系典型实例精细解剖，文昌凹陷文一段不同源–汇体系存在不同类型的控砂模式(图 8)：

(1)近源–陡坡–扇三角洲砂体型源–汇体系控砂模式(图 8a)。该类型边界坡度区间 23° ~ 30°，源区集水高差较大(平均 1 198 m)，汇水面积小(12.9 km^2)，发育“V”型沟谷，宽深比 4.9，沟谷短(1.9 km)且横截面积较小(约 0.40 km^2)，供源能力较弱，沉积物经

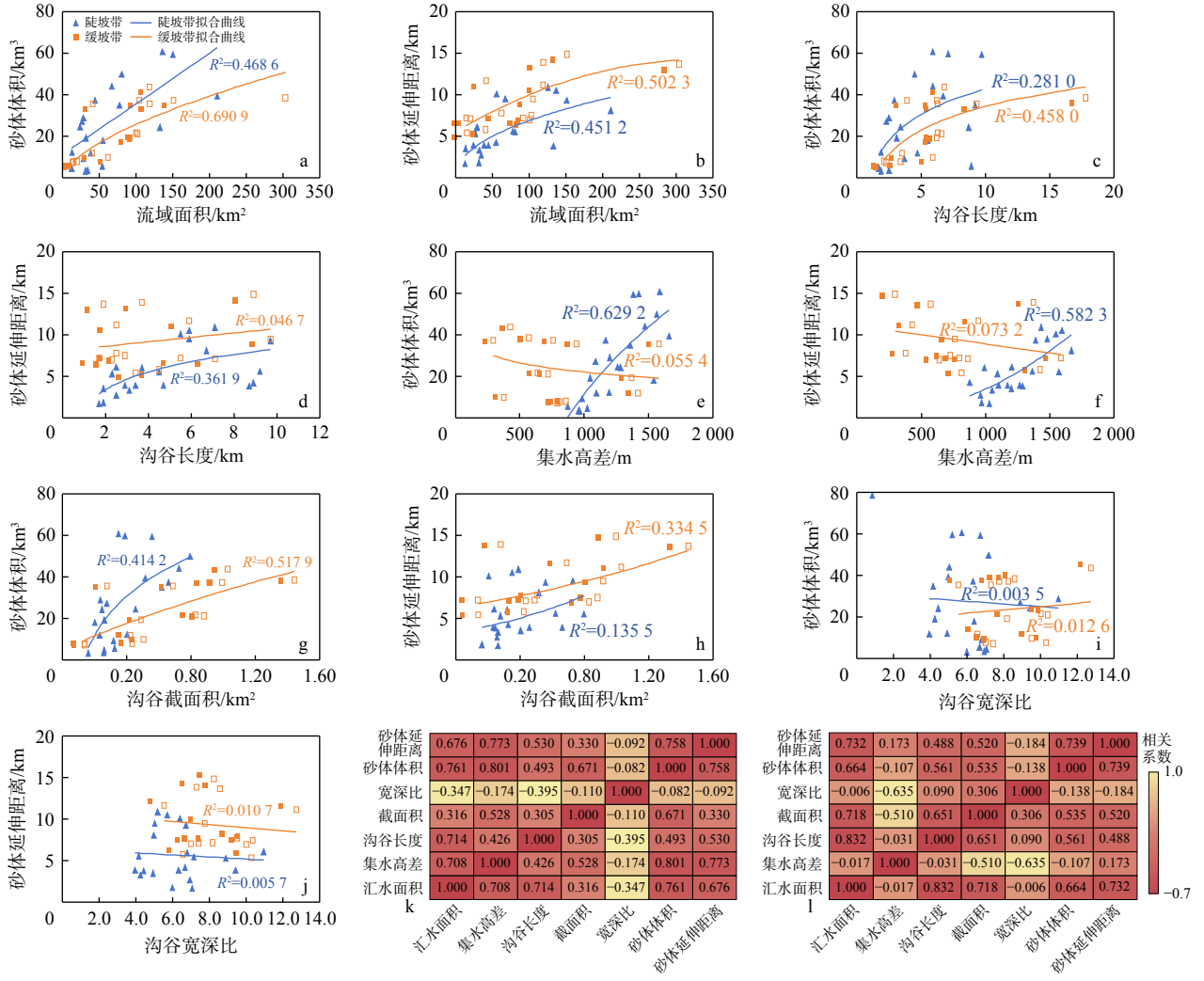


图 7　源–汇体系各要素之间关系定量表征

Fig. 7　Quantitative characterization of relationships between elements in the source-sink system

沟谷进入湖盆后直接在断层下降盘沉积扇三角洲砂体，砂体向盆内推进距离较短（3.5 km），厚度大（约 690 m）。

（2）近源–缓坡–扇三角洲砂体型控砂模式（图 8b）。该类型边界坡度区间 10° ~ 15°，源区高差较小（821 m），汇水面积小（22.4 km^2），发育“U-W”型沟谷，宽深比 7.6，沟谷短（3.5 km），横截面积小（仅 0.35 km^2），供源能力有限，因距离较短沉积物搬运流体未能转换为辫状河，经沟谷以冲积扇形式入湖，沿着缓坡在地形坡折处沉积扇三角洲砂体。砂体较近源陡坡带分布范围广（面积 71.4 km^2，延伸 9.0 km），平均厚度 256 m，厚度薄且相对均一。

（3）中长源–陡坡–扇三角洲砂体控砂模式（图 8c）。该类型边界坡度 25° ~ 45°，源区高差显著（1 261 m），汇水单元面积大（64.2 km^2），水动力强，沟谷数目多、长度稍长（5.3 km），横截面积较小（0.37 km^2），以“V”型沟谷为主，宽深比 6.1，供源能力强，将流域大量沉积物搬运入湖，由大型主控断裂控制的陡坡断裂下降盘可容纳空间充足，沉积物就近堆积扇三角洲砂体，扇体厚度较大（635 m），横向宽，纵向延伸距离有限（5.9 km）。

（4）中长源–缓坡–辫状河三角洲砂体控砂模式（图 8d）。该类型边界坡度 7° ~ 13°，源区高差最小（平均 726 m），但汇水面积极大（119.2 km^2），沟谷长度最长（7.3 km），横截面面积大（0.78 km^2），以“U-W”型沟谷为主，宽深比 8.9，仍具有较强的供源能力，碎屑物质沿着大规模沟谷搬运，缓坡带平缓地形易于分散水系，形成向湖方向远距离推进的辫状河三角洲沉积体（延伸 9.9 km），砂体横向较窄，厚度较薄（320 m），展布面积最大（91.1 km^2）。

4　结　论

（1）文昌凹陷文一段沉积期共发育 7 个物源体

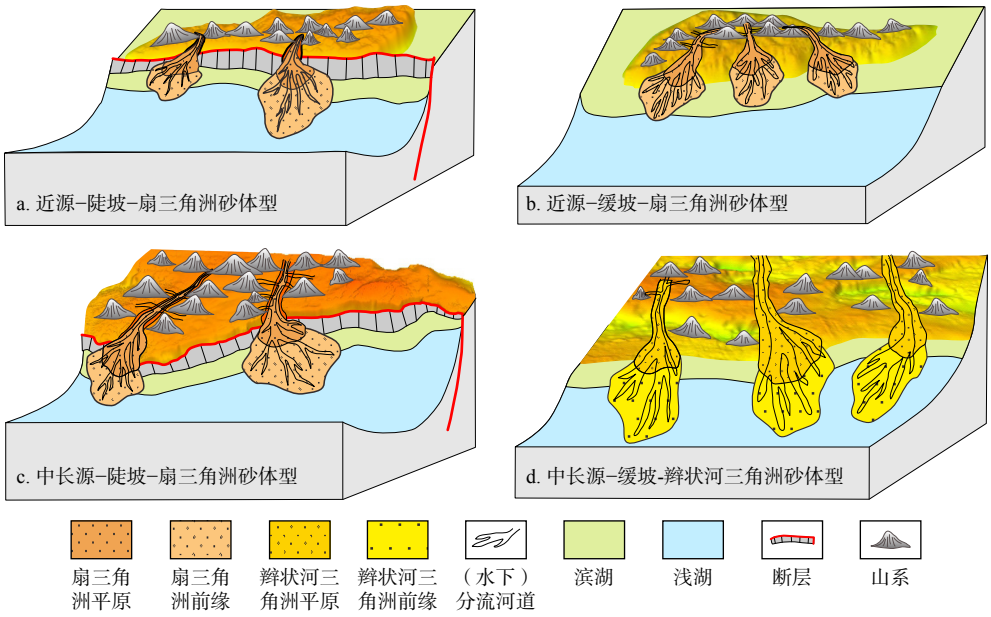


图 8　不同类型源–汇体系控砂模式示意图

Fig. 8　Sand control mechanisms of different source-sink system types

系，母岩类型以花岗岩、沉积岩为主。识别出 37 条主要的古沟谷输砂通道，可细分为“V”型、“U”型及“W”型沟谷。陡坡带边界坡度大于 20°，以“V”型沟谷为主；缓坡带边界坡度小于 20°，多发育“U-W”型沟谷。

（2）文一段沉积期，湖盆滨–浅湖沉积广泛，陡坡带发育扇三角洲，砂体较厚，粒度较粗，推进距离有限；缓坡带发育辫状河三角洲，砂体较薄，粒度较细，分选好，向湖盆内推进较长距离。盆内琼海凸起陡坡带、缓坡带均发育扇三角洲沉积。

（3）定量分析源–汇体系各要素关系发现，文一段砂体形成与规模是源–汇体系各要素综合作用的结果，陡坡带砂体与集水高差、汇水面积、沟谷横截面积相关性最高，缓坡带砂体则与汇水面积、沟谷长度、沟谷横截面积关系密切，建立了近源–陡坡–扇三角洲、近源–缓坡–扇三角洲、中长源–陡坡–扇三角洲、中长源–缓坡–辫状河三角洲 4 种源–汇体系控砂机制。

参考文献：

[1] WALSH J P, WIBERG P L, AALTO R, et al. Source-to-sink research: Economy of the earth's surface and its strata[J]. Earth Science Reviews, 2016, 153: 1-6.

[2] 朱红涛，徐长贵，朱筱敏，等. 陆相盆地源–汇系统要素耦合研究进展 [J]. 地球科学，2017，42(11)：1851-1870.
ZHU H T, XU C G, ZHU X M, et al. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin[J]. Earth Science, 2017, 42(11): 1851-1870.（in Chinese with English abstract）

[3] 聂银兰，朱筱敏，董艳蕾，等. 陆相断陷盆地源–汇系统要素表征及研究展望 [J]. 地质论评，2022，68(5)：1881-1896.
NIE Y L, ZHU X M, DONG Y L, et al. Characterization and research prospect of source-to-sink system elements in continental rift basin[J]. Geological Review, 2022, 68(5): 1881-1896.（in Chinese with English abstract）

[4] 徐长贵. 陆相断陷盆地源–汇时空耦合控砂原理：基本思想、概念体系及控砂模式 [J]. 中国海上油气，2013，25(4)：1-11.
XU C G. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basins: Basic idea, conceptual systems and controlling sand models[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(4): 1-11.（in Chinese with English abstract）

[5] 刘强虎，李志垚，陈贺贺，等. 陆相裂陷盆地深时源–汇系统关键地质问题及革新方向 [J]. 地球科学，2023，48(12)：4586-4612.
LIU Q H, LI Z Y, CHEN H H, et al. Key geological issues and innovation directions in deep-time source-to-sink system of continental rift basins[J]. Earth Science, 2023, 48(12): 4586-4612.（in Chinese with English abstract）

[6] 龚承林，齐昆，徐杰，等. 深水源–汇系统对多尺度气候变化的过程响应与反馈机制 [J]. 沉积学报，2021，39(1)：231-252.
GONG C L, QI K, XU J, et al. Process-product linkages and feedback mechanisms of deepwater source-to-sink responses to multi-scale climate changes[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 231-252.（in Chinese with English abstract）

[7] 陈星渝，张志杰，万力，等. 深时源-汇系统要素的常用定量分析方法 [J]. 地质科技通报，2024，43(1)：89-107.
CHEN X Y, ZHANG Z J, WAN L, et al. Quantitative analysis methods of source-to-sink systems in deep-time and their progress[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1): 89-107.（in Chinese with English abstract）

[8] 陈林，李珊珊，游君君，等. 文昌 B 凹陷古近系低渗储层物性影

响因素定量评价与应用 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 165-173.
CHEN L, LI S S, YOU J J, et al. Quantitative evaluation and application of factors affecting the properties of low permeability reservoirs from the Paleogene in Wenchang B Sag[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(3): 165-173. (in Chinese with English abstract)

[9] 杨希冰, 常露, 徐睿, 等. 珠江口盆地文昌凹陷陆相坡折带类型及其控砂作用 [J]. 地球科学, 2020, 45(3): 989-997.
YANG X B, CHANG L, XU R, et al. Types and sand control effect of terrestrial slope breaks of Wenchang Sag inside the Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2020, 45(3): 989-997. (in Chinese with English abstract)

[10] 李俊良, 雷宝华, 郑求根, 等. 珠江口盆地文昌凹陷应力场演化及其对成藏要素的控制作用 [J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(4): 601-609.
LI J L, LEI B H, ZHENG Q G, et al. Stress field evolution and its controls on oil accumulation in the Wenchang Sag[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015, 39(4): 601-609. (in Chinese with English abstract)

[11] 赵迎冬, 甘华军, 陈善斌, 等. 珠琼运动的厘定: 来自北部湾盆地福山凹陷构造沉积特征的启示 [J]. 中国地质, 2015, 42(4): 948-959.
ZHAO Y D, GAN H J, CHEN S B, et al. Determination of Zhu-Qiong movement: The enlightenment from tectonic and sedimentary characteristics of Fushan Sag, Beibuwan Basin[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 948-959. (in Chinese with English abstract)

[12] 王家豪, 刘丽华, 陈胜红, 等. 珠江口盆地恩平凹陷珠琼运动二幕的构造—沉积响应及区域构造意义 [J]. 石油学报, 2011, 32(4): 588-595.
WANG J H, LIU L H, CHEN S H, et al. Tectonic-sedimentary responses to the second episode of the Zhu-Qiong movement in the Enping Depression, Pearl River Mouth Basin and its regional tectonic significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 588-595. (in Chinese with English abstract)

[13] 杜晓峰, 庞小军, 黄晓波, 等. 辽西凹陷北部古近系沙河街组二段源-汇系统及其对滩坝砂体的控制 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 662-674.
DU X F, PANG X J, HUANG X B, et al. Characteristics of the source-to-sink system for the Paleogene Sha 2 Member of northern Liaoxi Sag, offshore Bohai Bay Basin and its control on beach bar sands[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 662-674. (in Chinese with English abstract)

[14] 宋凯, 吕剑文, 杜金良, 等. 鄂尔多斯盆地中部上三叠统延长组物源方向分析与三角洲沉积体系 [J]. 古地理学报, 2002, 4(3): 59-66.
SONG K, LYU J W, DU J L, et al. Source direction analysis and delta depositional systems of Yanchang Formation of the Upper Triassic in the central Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(3): 59-66. (in Chinese with English abstract)

[15] 彭光荣, 王绪诚, 陈维涛, 等. 珠江口盆地惠州 26 洼东南缘古近系恩平组上段断–坳转换期源–汇系统及勘探意义 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 613-625.
PENG G R, WANG X C, CHEN W T, et al. Source-to-sink system during rifting-depression transition period and its exploration significance: A case study of the Upper Enping Formation at southeastern margin of Huizhou 26 Sub-Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 613-625. (in Chinese with English abstract)

[16] 张世杰, 蒲秀刚, 李勇, 等. 黄骅坳陷孔店南部枣Ⅲ油组物源分析 [J]. 现代地质, 2013, 27(1): 186-190.
ZHANG S J, PU X G, LI Y, et al. Provenance analysis of ZaoⅢ reservoir group in southern Kongdian of Huanghua Depression[J]. Geoscience, 2013, 27(1): 186-190. (in Chinese with English abstract)

[17] WELTJE G J, VON EYNATTEN H. Quantitative provenance analysis of sediments: Review and outlook[J]. Sedimentary Geology, 2004, 171(1/2/3/4): 1-11.

[18] LEWIN A, MEINHOLD G, HINDERER M, et al. Heavy minerals as provenance indicator in glaciogenic successions: An example from the Palaeozoic of Ethiopia[J]. Journal of African Earth Sciences, 2020, 165: 103813.

[19] 曹立成, 姜涛, 王振峰, 等. 琼东南盆地新近系重矿物分布特征及其物源指示意义 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(5): 1971-1981.
CAO L C, JIANG T, WANG Z F, et al. Characteristics of heavy minerals and their implications for Neogene provenances evolution in Qiongdongnan Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(5): 1971-1981. (in Chinese with English abstract)

[20] ALLEN P A, ARMITAGE J J, CARTER A, et al. The Qs problem: Sediment volumetric balance of proximal foreland basin systems[J]. Sedimentology, 2013, 60(1): 102-130.

[21] 肖凡, 朱红涛, 徐长贵, 等. 利用前积角“玫瑰花”图判断前积体主物源方向 [J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(1): 181-188.
XIAO F, ZHU H T, XU C G, et al. Main provenance direction determination with the rose diagram of progradation angle[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(1): 181-188. (in Chinese with English abstract)

[22] 张金伟, 王军, 吴明荣. 利用地震前积反射特征确定古水流方向的沉积几何方法 [J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(5): 53-55.
ZHANG J W, WANG J, WU M R. A geometrical method of calculating paleocurrent direction using seismic progradation reflection characteristics[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(5): 53-55. (in Chinese with English abstract)

[23] 姜正龙, 邓宏文, 林会喜, 等. 古地貌恢复方法及应用: 以济阳坳陷桩西地区沙二段为例 [J]. 现代地质, 2009, 23(5): 865-871.
JIANG Z L, DENG H W, LIN H X, et al. Methods and application of paleo-geomorphologies rebuilding: An example of the Second Member of Shahejie Formation, Zhuangxi area, Jiyang Depression[J]. Geoscience, 2009, 23(5): 865-871. (in Chinese with English abstract)

[24] 何文军, 郑孟林, 费李莹, 等. 陆相坳陷盆地边缘沉积区古地貌恢复: 以准噶尔盆地玛湖地区三叠系百口泉组为例 [J]. 古地理学报, 2019, 21(5): 803-816.
HE W J, ZHENG M L, FEI L Y, et al. Ancient landform restoration of marginal sedimentary area in the continental depression basin: A case study of the Triassic Baikouquan Formation in Mahu

area of Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(5): 803-816. (in Chinese with English abstract)

[25] 李想, 付磊, 魏璞, 等. 沉积古地貌恢复及古地貌对沉积体系的控制作用: 以准噶尔盆地石西地区三叠系百口泉组为例 [J]. 岩性油气藏, 2025, 37(2): 38-48.
LI X, FU L, WEI P, et al. Restoration of sedimentary paleogeography and its control on sedimentary system: A case study of the Triassic Baikouquan Formation in Shixi area of Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2025, 37(2): 38-48. (in Chinese with English abstract)

[26] XIN Y L, REN J Y, LI J P. Control of tectonic-paleogeomorphology on deposition: A case from the Shahejie Formation Sha 3 Member, Laizhouwan Sag, southern Bohai Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 325-332.

[27] 朱红涛, 徐长贵, 杜晓峰, 等. 陆相盆地古源-汇系统定量重建、级次划分及耦合模式 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 539-552.
ZHU H T, XU C G, DU X F, et al. Quantitative reconstruction, hierarchical division and coupling mode establishment for ancient source-to-sink systems in continental basins[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 539-552. (in Chinese with English abstract)

[28] 冯斌, 黄晓波, 何幼斌, 等. 渤海湾盆地庙西北地区古近系沙河街组三段源-汇系统重建 [J]. 岩性油气藏, 2024, 36(3): 84-95.
FENG B, HUANG X B, HE Y B, et al. Reconstruction of source-to-sink system of the Third Member of Paleogene Shahejie Formation in Miaoxibei area, Bohai Bay Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(3): 84-95. (in Chinese with English abstract)

[29] 胡贺伟, 李慧勇, 于海波, 等. 渤海湾盆地埕北低凸起及围区古近系"源-汇"系统控砂原理定量分析 [J]. 古地理学报, 2020, 22(2): 266-277.
HU H W, LI H Y, YU H B, et al. Quantitative analysis of source-to-sink system controls on sand-body distribution of the Paleogene in Chengbei low uplift and surrounding areas, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(2): 266-277. (in Chinese with English abstract)

[30] 朱珍君, 李琦, 陈贺贺, 等. 东海陆架盆地丽水凹陷古新统源-汇系统耦合及时-空演化 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 735-752.
ZHU Z J, LI Q, CHEN H H, et al. Source-to-sink coupling and temporal-spatial evolution in the Lishui Sag of East China Sea Shelf Basin during the Paleocene[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 735-752. (in Chinese with English abstract)

[31] 蔡全升, 胡明毅, 陈孝红, 等. 小型断陷湖盆扇三角洲沉积特征与发育模式: 以徐家围子断陷北部沙河子组为例 [J]. 岩性油气藏, 2018, 30(1): 86-96.
CAI Q S, HU M Y, CHEN X H, et al. Sedimentary characteristics and development model of fan delta in small faulted basin: A case of Shahezi Formation in northern Xujiaweizi Fault Depression, NE China[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(1): 86-96. (in Chinese with English abstract)

[32] 纪友亮, 李清山, 王勇, 等. 高邮凹陷古近系戴南组扇三角洲沉积体系及其沉积相模式 [J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 9-19.
JI Y L, LI Q S, WANG Y, et al. Fan delta sedimentary system and facies models of Dainan Formation of Paleogene in Gaoyou Sag[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 9-19. (in Chinese with English abstract)

[33] MCPHERSON J G, SHANMUGAM G, MOIOLA R J. Fan-deltas and braid deltas: Varieties of coarse-grained deltas[J]. Geological Society of America Bulletin, 1987, 99(3): 331.

[34] 何岸北, 胡煜昭, 任涛, 等. 新疆乌拉根铅锌矿克五段扇三角洲沉积模式 [J]. 沉积学报, 2020, 38(2): 245-256.
HE A B, HU Y Z, REN T, et al. Sedimentary model of fan delta in the Fifth Member of Kizilsu Group in Uragen Pb-Zn deposit, Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(2): 245-256. (in Chinese with English abstract)

[35] LIU B B, TAN C P, YU X H, et al. Sedimentary characteristics and controls of a retreating, coarse-grained fan-delta system in the Lower Triassic, Mahu Depression, northwestern China[J]. Geological Journal, 2019, 54(3): 1141-1159.

[36] 李茂, 李胜利, 姜平, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷涠11区流一段扇三角洲沉积特征及控制因素 [J]. 现代地质, 2013, 27(4): 915-924.
LI M, LI S L, JIANG P, et al. Sedimentary characteristics of fan deltas and the dominated factors in W11 area of 1st Member of Liushagang Formation in Weixinan Depression, Beibuwan Basin[J]. Geoscience, 2013, 27(4): 915-924. (in Chinese with English abstract)

[37] 刘磊, 钟怡江, 陈洪德, 等. 中国东部箕状断陷湖盆扇三角洲与辫状河三角洲对比研究 [J]. 沉积学报, 2015, 33(6): 1170-1181.
LIU L, ZHONG Y J, CHEN H D, et al. Contrastive research of fan deltas and braided river deltas in half-graben rift lake basin in East China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(6): 1170-1181. (in Chinese with English abstract)

[38] 赵春娟, 徐淑娟, 程宏岗, 等. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组沉积相类型及演化模式 [J]. 沉积学报, 2024, 42(4): 1460-1478.
ZHAO C J, XU S J, CHENG H G, et al. Sedimentary facies types and evolution models of the Shahezi Formation in the Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(4): 1460-1478. (in Chinese with English abstract)

[39] 赵汉卿, 李超, 郭诚, 等. 渤海湾盆地莱州湾凹陷沙三上段近源砂质辫状河三角洲沉积特征 [J]. 世界地质, 2024, 43(1): 37-46.
ZHAO H Q, LI C, GUO C, et al. Sedimentary characteristics of near source sandy braided river delta in the Upper 3rd Member of Shahejie Formation in Laizhou Bay Sag, Bohai Bay Basin[J]. World Geology, 2024, 43(1): 37-46. (in Chinese with English abstract)

[40] 陶文芳, 葛家旺, 雷永昌, 等. 转换斜坡型辫状河三角洲沉积特征: 以珠江口盆地惠州凹陷始新统为例 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 103-114.
TAO W F, GE J W, LEI Y C, et al. Depositional characteristics of a relay ramp controlled braided deltaic system: A case study in the Eocene Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin, China[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 103-114. (in Chinese with English abstract)

[41] 侯国伟, 李帅, 秦兰芝, 等. 西湖凹陷西部斜坡带平湖组源-汇体系特征 [J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 29-39.

HOU G W, LI S, QIN L Z, et al. Source-to-sink system of Pinghu Formation in west slope belt of Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(3): 29-39. (in Chinese with English abstract)

[42] 李建平, 辛仁臣, 向淑敏, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷古近系东营组三段沉积特征 [J]. 古地理学报, 2008, 10(4): 363-370.
LI J P, XIN R C, XIANG S M, et al. Sedimentary characteristics of the Member 3 of Paleogene Dongying Formation in Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(4): 363-370. (in Chinese with English abstract)

Summary for “陆相断陷湖盆源–汇体系重构与控砂机制研究: 以珠江口盆地文昌凹陷文一段为例”

Reconstruction of source-sink system and sand control mechanisms in continental faulted lake basins: A case study of the First Member of the Wenchang Formation in the Wenchang Sag of the Pearl River Mouth Basin

CHEN Yue , ZHANG Jianxin , WANG Li , XU Shouli , ZHU Peiyuan , ZHANG Daojun*

Zhanjiang Branch, CNOOC Limited, Zhanjiang Guangdong 524057, China

First author, E-mail: chenyue10@cnooc.com.cn

* Corresponding author, E-mail: zhangdaojun@cnooc.com.cn

Abstract: [**Objective**] Controlled by complex factors such as basin structure, climate, and water depth, the quantitative reconstruction of source-sink systems, sand transport pathways, and sedimentation processes in rifting lacustrine basins remains a persistent challenge. This study addresses this knowledge gap by investigating the First Member of the Wenchang Formation in the Wenchang Sag of the western Pearl River Mouth Basin. [**Methods**] Key elements of the source-sink system are quantitatively analyzed through methods including the restoration of lithology and geomorphology in the provenance area, characterization of paleo-valleys, recognition of fault boundary patterns, and determination of sedimentary body types and scales. The coupling relationships between these elements are then discussed. [**Results**] The results show that the deposition of the First Member of the Wenchang Formation was dominated by fan delta, braided river delta, and shore-shallow lacustrine deposits. The bedrock types of the provenance area are primarily magmatic and sedimentary rocks, with seven provenance systems identified. Four sand control mechanisms within the source-sink system are recognized, and a total of 37 paleo-valleys are identified. In the steep slope zone, sedimentary sand bodies show the closest correlation with elevation difference, watershed area, and cross-sectional area of the valley. In contrast, the ramp zone exhibits the strongest correlation with watershed area, valley length, and cross-sectional area of the valley. [**Conclusion**] These findings provide a basis for describing sedimentary systems in continental rifting lacustrine basins.

Key words: rifting lacustrine basin; source-sink system; quantitative analysis; sand control mechanism; Wenchang Sag; Pearl River Mouth Basin

Received: 2025-02-25; Revised: 2025-04-01; Accepted: 2025-04-08

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250087