

doi:10.3799/dqkx.2017.128

云南洱海现代湖盆源—汇系统划分、特征及差异

朱秀¹, 朱红涛^{1*}, 曾洪流², 杨香华¹

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 美国德克萨斯大学奥斯汀分校, 美国奥斯汀 78712

摘要:现代湖盆源—汇系统分析, 可为古代源—汇系统研究提供参考依据。将云南洱海现代湖盆源—汇系统划分为西(S2S-W)、东(S2S-E)、北岸(S2S-N)3个独立的源—汇系统, S2S-E 物源区母岩主要为碳酸盐岩, 沉积体数量少、规模小($<10 \text{ km}^2$); S2S-W 物源区母岩主要为变质岩及少量花岗岩、碳酸盐岩, 沉积体数量多、规模大($>40 \text{ km}^2$), 相互叠置、连片分布; S2S-N 为轴向物源型源—汇系统, 母岩主要为碎屑岩, 沉积物供应充足, 形成大型沉积体。研究表明, 同一盆地(洼陷)内可存在多个源—汇系统, 由于母岩类型、构造活动、古地貌等因素的影响, 可造成不同源—汇系统的流域面积、沉积区面积及沉积响应存在差异, 在古代源—汇系统研究中需重视不同源—汇系统之间的差异性研究。

关键词:洱海; 源—汇系统; 母岩类型; 差异性; 控制因素; 沉积; 石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2017)11-2010-15

收稿日期: 2017-05-14

Subdivision, Characteristics, and Varieties of the Source-to-Sink Systems of the Modern Lake Erhai Basin, Yunnan Province

Zhu Xiu¹, Zhu Hongtao^{1*}, Zeng Hongliu², Yang Xianghua¹

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074

2. Bureau of Economic Geology, Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, Texas 78712, USA

Abstract: Studies of the modern Source-to-Sink system in Lake Basin can provide a basis for studying their ancient counterparts. In this paper, we analyzed characteristics of modern Source-to-Sink systems in the Lake Erhai basin and identified three subsystems in the western (S2S-W), eastern (S2S-E) and northern (S2S-N) shores of the Lake Erhai basin, respectively. In S2S-E, the bedrocks in source area are primarily carbonate rocks and the number and scale of sedimentary bodies in sink area is small ($<10 \text{ km}^2$); in S2S-W, the bedrocks in source area consist of metamorphic rock sand a few granitic and carbonate rocks, and large scale ($>40 \text{ km}^2$) sedimentary bodies in sink area easily developed, feature in gextensive and concatenated distribution; in S2S-N(axial source), bedrocks are composed mainly of clastic rocks and the scale of sedimentary bodies in sink area are large. Studies of modern Source-to-Sink system in Lake basin suggest that there are many Source-to-Sink systems in the same basin (sag) and in which significant distinctions between the watershed area, sedimentary body area and sedimentation response exist because of controlling factors such as bedrock type, tectonic activity, paleomorphology, basin boundaries, and transport channel, among others, which implies that more attention should be paid to the distinguishing characteristics of Source-to-Sink systems in further study of ancient Source-to-Sink systems.

Key words: Lake Erhai basin; Source-to-Sink system (S2S); bedrock; varieties; controlling factors; sedimentary; petroleum geology.

剥蚀地貌和沉积地貌之间被沉积物搬运路径联系在一起, 共同构成地表的源—汇系统(Source-to-

Sink system, 简称 S2S)(Allen and Hovius, 1998; Allen, 2008a, 2008b; Sømme *et al.*, 2009a, 2009b,

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41572084);国家科技重大专项(No.2016ZX05024-003-007)。

作者简介:朱秀(1992—),女,硕士研究生,层序地层学与沉积学,ORCID: 0000-0002-6358-2875. E-mail: 1773610481@qq.com

*通信作者:朱红涛, E-mail: htzhu@cug.edu.cn

引用格式:朱秀,朱红涛,曾洪流,等,2017.云南洱海现代湖盆源—汇系统划分、特征及差异.地球科学,42(11):2010—2024.

2013b; Sømme and Jackson, 2013a; Liu *et al.*, 2016).近年来,源—汇系统的研究更多的以海相为主,主要探讨构造、气候两大因素对洋—陆边缘盆地源—汇系统的控制作用及沉积区沉积体系的预测方法(Allen and Densmore, 2000; Galloway *et al.*, 2000; Galloway, 2001; Allen, 2008a, 2008b; Sømme *et al.*, 2009a, 2009b, 2013b; Sømme and Jackson, 2013a)。国内外对陆相盆地周缘的母岩组成、分布特征及物源区与沉积区之间的源—汇关系讨论多为定性分析,尤其是对物源区不同母岩类型沉积物供给通量的差异性研究非常薄弱,其难点在于:(1)陆相盆地类型多样,盆地边界条件复杂;(2)陆相盆地源—汇系统控制因素多样,在构造、气候的基础上,盆地古地貌尤为重要,具有多隆多洼的古地理格局和多种不同搬运通道;(3)陆相盆地沉积体系更为复杂多变,在不同边界条件的控制下,可在盆地周缘沉积区形成不同沉积体系,呈现多种沉积体系共存的格局(朱红涛等,2013;李思田,2015;刘强虎等,2016;朱筱敏等,2016;徐长贵等,2017)。但是,陆相盆地源—汇系统研究也具有以下优势:(1)与开阔的海相盆地相比,陆相盆地面积偏小,多短物源,沉积区为局限盆,源—渠—汇关系相对清晰;(2)小盆地源—汇系统的控制因素更易观察和定量化。

云南洱海现代湖盆及围区山脉构成完整的源—汇系统,其源—汇系统特征具有典型的代表性,洱海东、西两岸的物源区母岩类型存在明显差异,对应的

沉积区沉积体规模也存在明显差异,是开展陆相盆地不同母岩类型源—汇系统差异性的天然研究区。前人关于洱海的研究主要集中于湖泊水体污染控制、湖泊生态修复和富营养化防治等环境科学方面(Dearing and Jones, 2003; Dearing *et al.*, 2008; 张仕军等,2011;赵海超等,2013;卢慧斌等,2016;王显丽等,2016),构造、地貌、降水和气候方面也做过一些研究(朱海虹和姚秉衡,1989;朱海虹,1991; Leloup *et al.*, 1993; Royden *et al.*, 1997; Socquet and Pubellier, 2005; 万晔等,2005;黄慧君等,2013;赵春强等,2014),对于洱海盆地的源—汇系统、尤其是东、西两岸不同母岩类型的源—汇系统差异性尚未开展研究工作。因此,本文在系统分析洱海现代湖盆源—汇系统特征的基础上,进一步解剖洱海东、西、北3岸源—汇系统的差异性,探讨物源区不同母岩类型对沉积区的沉积充填的影响,揭示不同母岩类型源—汇系统的差异性,最后探讨造成不同母岩类型源—汇系统差异性的主控因素。

1 区域地质概况

洱海位于云南省华南板块扬子地台西缘,是滇西最大(256.7 km^2)、最深(21.5 m)的淡水湖泊(王二七等,2006),其平均海拔约 1 962 m,平均水深 10.6 m(黄慧君等,2013)。其南北长约 42.5 km,东西宽 8.4 km,面积约 256.7 km^2 (许鲁君等,2014; Li

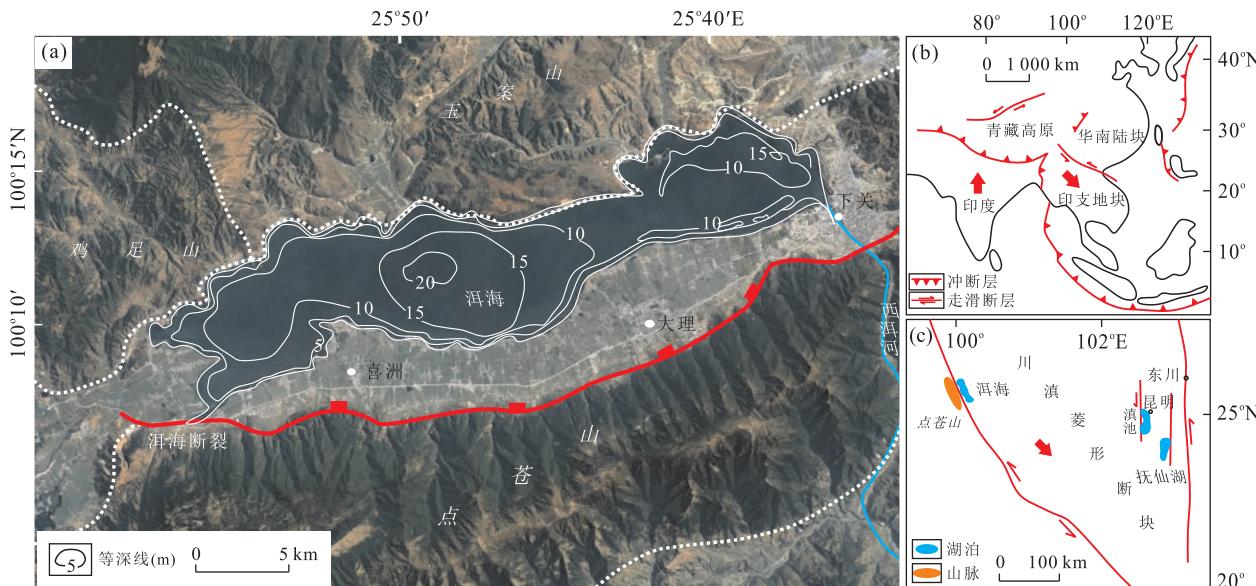


图 1 云南洱海现代湖盆区域位置

Fig.1 Location of the modern Lake Erhai basin in Yunnan Province

et al., 2017).西侧以洱海断裂与点苍山(海拔高度约为 3 500 m)相隔,东侧与玉案山(海拔高度约为 2 700 m)、鸡足山(海拔高度约 3 200 m)为界,构成了一个沿 NNW 方向延伸、狭长且向东倾斜的高原内陆半地堑断陷湖盆(图 1)(Leloup *et al.*, 1993; Wang *et al.*, 2004; Socquet and Pubellier, 2005; Dearing *et al.*, 2008; 赵春强等, 2014)。

研究区海拔高度差异悬殊,最高点为西侧点苍山上的龙马峰,海拔 4 122 m,而最低点为湖泊唯一出口——西洱河,海拔仅 1 852 m。该区气候温和,全年盛行西南风,属低纬度高原季风气候,年均气温 13.5°;干湿季分明,年均降雨量 1 150 mm,5~10 月为雨季,雨量约占全年雨量的 78%,11 月至次年 4 月为干季,雨量占全年雨量的 22% (Xu *et al.*, 2015; 丁文荣, 2016; 卢慧斌等, 2016)。

洱海盆地的形成和印度板块与青藏高原的俯冲碰撞有关,该盆地位于青藏高原东南边缘规模最大的一条新生代走滑剪切带——红河—哀牢山(Ailao Shan-Red river shear zone, ASRR)断裂带上,呈长条状展布于断裂带西侧(图 1b、1c)(Tappognier *et al.*, 1990; Royden *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2014)。新生代以来,印度板块向东北方向漂移与青藏高原东南边缘俯冲碰撞,导致处于华南板块川滇菱形断块内的云贵高原向东南方向滑移,形成了一系列正断层控制的断陷盆地,如洱海、滇池和抚仙湖等(万晔等, 2005; 王二七等, 2006; 李宝龙等, 2012; 许鲁君等, 2014; 宫伟和姜效典, 2017)。钻孔和物探资料也揭示,洱海盆地自形成以来,已接受厚达 2 000 m 以上的晚新生代沉积,时代为上新世或中、晚更新世(彭贵和焦文强, 1991; 丁文荣, 2016)。

2 洱海源—汇系统划分及特征

源—汇系统作为一个完整的系统,物源区母岩类型、构造作用以及气候条件等变化所引起的物源供应量变化,将对下游沉积区沉积体系的性质(沉积体类型及面积)等产生重要的影响(Allen and Hovius, 1998; Allen, 2005, 2008a, 2008b; Sømme *et al.*, 2009a, 2009b, 2013b; Sømme and Jackson, 2013a; Liu *et al.*, 2016)。

根据洱海及其周缘地区地貌地形、母岩类型(图 2)、发育水系等特征,可以划分出 3 个源—汇系统,分别为西岸“点苍山—洱海”断裂陡坡(约 10°)源—

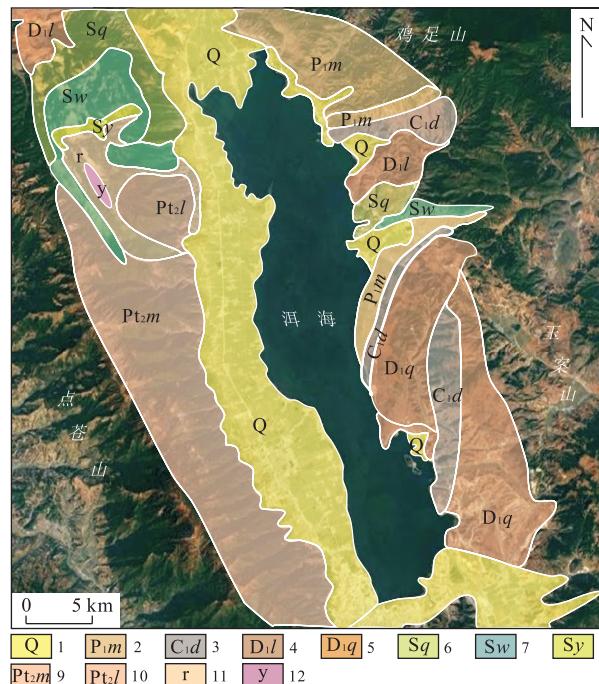


图 2 洱海现代湖盆西岸(S2S-W)、东岸(S2S-E)和北岸(S2S-N)地层特征

Fig.2 Strata characteristics of the S2S-W, S2S-E, and S2S-N for the western, eastern, and northern parts of the modern Lake Erhai basin

1.第四系砂土、细砂、粘土;2.二叠系茅口组灰岩夹角砾状灰岩;3.石炭系斗项山组白云质灰岩;4.泥盆系莲花组白云岩;5.泥盆系青山组灰岩;6.志留系青山组灰岩;7.志留系五福山组白云岩\白云质灰岩;8.志留系阴阳山组陆屑白云岩;9.中元古界苍山群茫涌溪岩组片岩及混合岩;10.中元古界苍山群龙泉峰岩组片岩基混合岩;11.燕山早期斜长花岗岩;12.印支期二长花岗岩

汇系统(S2S-W)、东岸“玉案山—洱海”无断裂缓坡(<3°)源—汇系统(S2S-E)和北岸“鸡足山—洱海”轴向源—汇系统(S2S-N)(图 3, 图 4)。

2.1 S2S-W

根据物源区母岩类型的不同,S2S-W 从南向北依次细分为 S2S-W-1、S2S-W-2 和 S2S-W-3 三个子系统,分别对应于变质岩母岩区、花岗岩和变质岩混合母岩区以及碳酸盐岩母岩区。其中,根据沉积区沉积体特征,将 S2S-W-1 从北向南进一步细分为 S2S-W-1-1、S2S-W-1-2 和 S2S-W-1-3(图 3)。

2.1.1 物源区特征 (1)母岩类型及流域面积。S2S-W 出露地层主要为前寒武系苍山群变质杂岩(大理岩、片麻岩、千枚岩和片岩),印支期、晋宁期二长花岗岩,志留系阴阳山组陆屑白云岩,五福山组白云岩、白云质灰岩以及青山组灰岩等(图 2)。其中变质杂岩体广泛分布于 S2S-W 物源区的中部、南部(S2S-W-1),而印支期、晋宁期二长花岗岩

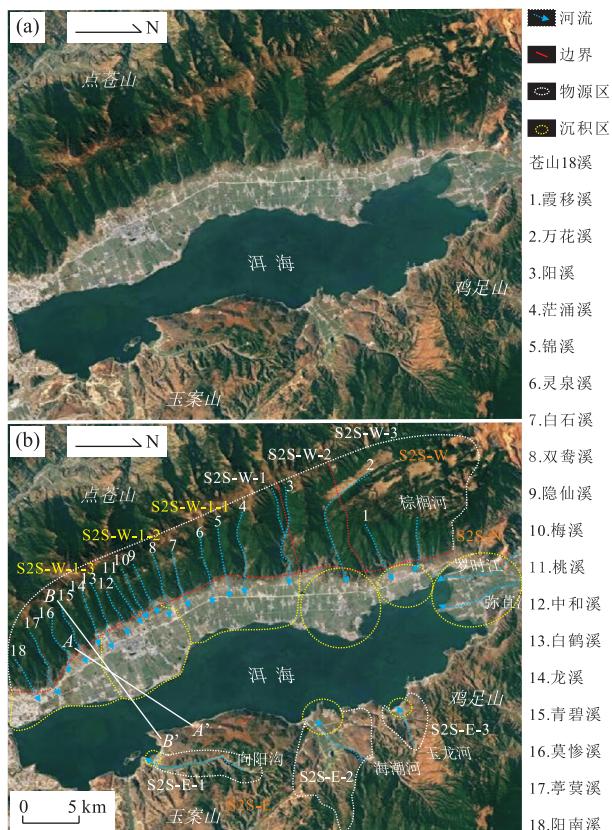


图 3 洱海现代湖盆西岸(S2S-W)、东岸(S2S-E)和北岸(S2S-N)源—汇系统特征

Fig.3 Characteristics of the S2S-W, S2S-E, and S2S-N for the western, eastern, and northern parts of the modern Lake Erhai basin

(S2S-W-2)以及志留系灰岩、白云岩(S2S-W-3)则少量出露于西北部(图 3).其中,S2S-W-1、S2S-W-2 和 S2S-W-3 对应形成的流域面积分别为 161.6 km^2 、 34.9 km^2 和 19.8 km^2 ;而 S2S-W-1 可以进一步分为 S2S-W-1-1(88.6 km^2)、S2S-W-1-2(29.8 km^2) 和 S2S-W-1-3(43.2 km^2)3 部分(图 3, 图 4).

(2) 地貌、降水及植被特征.从地貌形态上来看,物源区点苍山是一个弓形山脉(弓的凹面包络着洱海湖区),南北绵延约 50 km,东西宽约 19~21 km,坡度 10° 左右(图 3).主要由 19 座南北走向的山峰组成,平均海拔约 3 500 m,其中 7 个峰海拔达到 4 000 m 以上,最高峰龙马峰海拔达 4 122 m(卢慧斌等,2016).峰与峰之间分布有稳定的山间溪流—苍山 18 溪(渠):霞移溪、万花溪、阳溪、茫涌溪、锦溪、灵泉溪、白石溪、双鸯溪、隐仙溪、梅溪、桃溪、中和溪、白鹤溪、龙溪、青碧溪、莫惨溪、葶苈溪和阳南溪等(自北向南)(图 3, 图 4),可以将山上经风化剥蚀后的碎屑物质源源不断的搬运下来沉积在山麓之

间,形成洪—冲积扇裙/滨湖相.年降水量充沛,多年平均降水量在 1 000 mm 以上,植被类型丰富,森林覆盖率高(况明生等,2002).

2.1.2 沉积区特征 受断裂活动的影响,S2S-W 的沉积区(1 962 m)与物源区形成了约 2 000 m 的高差.沉积体主要由发育在物源区的大理洪—冲积扇裙以及形成于沉积区的湖积平原组成(万晔等,2005;Shen et al., 2006;顾佳妮等,2016;陈安东等,2016;张全等,2016)(图 3).物源区洪—冲积扇裙南北跨度达 50 km,东西宽 2~3 km,主要由砾石、砂砾石、砂、粘土等组成;砾石、砂砾石、砂层分选性及磨圆度差,而扇缘相对较好(由明宇等,2016).之后经由点苍山 18 条溪(渠)搬运至沉积区沉积,发育湖积平原.湖积平原主要由第四系河湖相碎屑岩、泥灰岩,松散堆积物等组成,宽度为 1~3 km,呈现大型沉积体“相互叠置、带状分布”的特点(图 3, 图 5).

半定量统计沉积区沉积体面积(图 4)表明,不同供源母岩区对应的沉积区沉积体面积之间存在一定差异:S2S-W-1(变质岩供源区)的沉积体面积最大,约 134.4 km^2 ;S2S-W-2(花岗岩和变质岩混合供源区)次之,约 18.1 km^2 ;S2S-W-3(碳酸盐岩供源区)最小,约 9.9 km^2 ;其中,根据沉积体叠置情况,S2S-W-1 可以进一步分为 43.8 km^2 (S2S-W-1-1)、 48.5 km^2 (S2S-W-1-2) 和 42.1 km^2 (S2S-W-1-3).

2.1.3 源—汇系统耦合关系 S2S-W 供源区主要分为易被风化的变质岩供源区(S2S-W-1)、抗侵蚀能力弱的花岗岩和变质岩混合供源区(S2S-W-2)以及不易被风化的碳酸盐岩供源区(S2S-W-3),三者对应的流域面积依次减小,分别为 161.6 km^2 、 34.9 km^2 和 19.6 km^2 ; 较高的年均降雨量($>1 000 \text{ mm}$)、丰富的植被类型以及水系(苍山 18 溪)发育等特点表明本区气候偏于湿润有利于沉积物的侵蚀和搬运;物源区和沉积区受断裂活动的控制,地形高差大(约 2 000 m)、坡度陡(约 10°);这些因素导致 S2S-W 沉积区发育大面积“相互叠置、带状分布”的沉积体,且沉积体面积依次减小,分别为 134.4 km^2 (S2S-W-1)、 18.1 km^2 (S2S-W-2)、 9.9 km^2 (S2S-W-3).

2.2 S2S-E

S2S-E 从南向北可以进一步划分为 3 个源—汇子系统,分别为 S2S-E-1、S2S-E-2 和 S2S-E-3(图 3),3 个子系统的物源区均为碳酸盐岩母岩区,对应沉积区沉积体不发育.

2.2.1 物源区特征 (1)母岩类型.出露地层主要为

源汇系统	子系统	源		渠					汇	
		母岩类型	流域面积(km ²)	主河道	最长河道(km)	宽度(m)	弯度	边界样式	沉积体面积(km ²)	
S2S-W	S2S-W-1-1	中元古界变质岩	88.6	26.2	阳溪	9.3	5.8	1.1	断裂陡坡 (12 °C)	43.8
				27.6	茫涌溪	7.7	5.8	1.1		
				10.4	锦溪	4.5	5.5	1.0		
				9.9	灵泉溪	4.4	5.2	1.1		
				14.5	百石溪	3.9	5.1	1.0		
	S2S-W-1	中元古界变质岩	29.8	5.2	双鸯溪	4.1	4.8	1.1	断裂陡坡 (12 °C)	48.5
				6.1	隐仙溪	4.3	4.2	1.2		
				4.7	梅溪	4.6	4.8	1.0		
				4.3	桃溪	5.5	5.7	1.1		
				5.3	中和溪	3.7	3.2	1.1		
				4.2	白鹤溪	4.8	4.3	1.1		
	S2S-W-1-3	中元古界变质岩	43.1	8.2	龙溪	5.9	6.3	1.2	断裂陡坡 (10 °C)	42.1
				8.8	青碧溪	5.5	5.6	1.1		
				9.2	莫惨溪	5.4	4.4	1.0		
				10.1	葶苈溪	6.3	5.7	1.1		
				6.9	阳南溪	3.3	3.1	1.2		
S2S-W-2	/	中元古界变质岩和印支、晋宁花岗岩	34.9	34.9	万花溪	11.7	5.3	1.5	断裂陡坡 (8.5 °C)	18.1
	S2S-W-3	古生界碳酸盐岩	19.6	5.2	棕榈河	5.2	4.6	1.1	断裂陡坡 (10 °C)	9.9
S2S-E				14.4	霞移溪	5.6	5.9	1.1		
S2S-E-1	古生界碳酸盐岩	37.8	12.8	向阳沟	11.3	5.1	1.1	斜坡 (2.8 °C)	1.1	
S2S-E-2			19.9	海潮河	8.8	4.5	1.1		12.1	
S2S-E-3			5.1	玉龙河	1.9	4.2	1.1		9.5	
S2S-N	/	二叠系角砾岩	133.1	133.1	弥苴河	56.2	8.8	1.1	斜坡 (2.5 °C)	42.8
	/				罗时江	20.1	5.6	1.1		

图 4 洱海现代湖盆源—汇系统参数

Fig.4 Parameters of S2S of the modern Lake Erhai basin

古生界碳酸盐岩,从南向北依次为泥盆系青山组灰岩、石炭系斗项山组白云质灰岩、二叠系茅口组灰岩夹角砾状灰岩、志留系五福山组白云岩、青山组灰岩以及莲花山组白云岩(图 2)。

S2S-E-1 呈孤立的长条状展布于中南部,对应母岩类型为石炭系斗项山组白云质灰岩,流域面积约为 12.8 km²;S2S-E-2 和 S2S-E-3 呈梨形分布于中、北部,流域面积分别为 19.9 km² 和 5.1 km²;其中,S2S-E-2 对应母岩为二叠系茅口组灰岩夹角砾状灰岩、志留系五福山组白云岩和青山组灰岩,而 S2S-E-3 为二叠系茅口组灰岩夹角砾状灰岩、志留系莲花山组白云岩以及石炭系斗项山组白云质灰岩(图 3,图 4)。

(2)地貌、降雨及植被特征。从地貌形态上来看,洱海东岸玉案山表现为经流水作用长期侵蚀形成的波状丘陵,海拔在 2 100~2 600 m;地形坡度较缓,

约为 3°(万晔等,2005;罗睿洁等,2015),向北以斜坡向宾川鸡足山(3 248 m)山地地貌过渡,岩层倾向西,与点苍山断块共同构成了洱海大向斜构造,海拔 2 400~2 600 m 为面积较大、分布较连续的准平原,是洱海与宾川盆地的分水岭,由于宾川河流不断向西侵蚀,致使分水岭不断向西迁移,该岸为石灰岩地形,山上岩石较多,土层较薄,河流稀少,流域面积也往往较小(罗睿洁等,2015)。气候的突出特点为冬春少雨干旱,植被稀疏,具有耐旱不耐寒的特点(刘江丽,2012)。

2.2.2 沉积区特征

洱海东岸发育了典型的高原内陆湖泊湖岸侵蚀地貌。S2S-E-1、S2S-E-2 和 S2S-E-3 发育的沉积体具有“小型(<10 km²)、孤立”的特点,面积分别为 1.1 km²、9.5 km²、1.5 km²,且往往分布在河流(玉龙河、海潮河)附近,其平均海拔低于 2 000 m(图 3,图 4)。

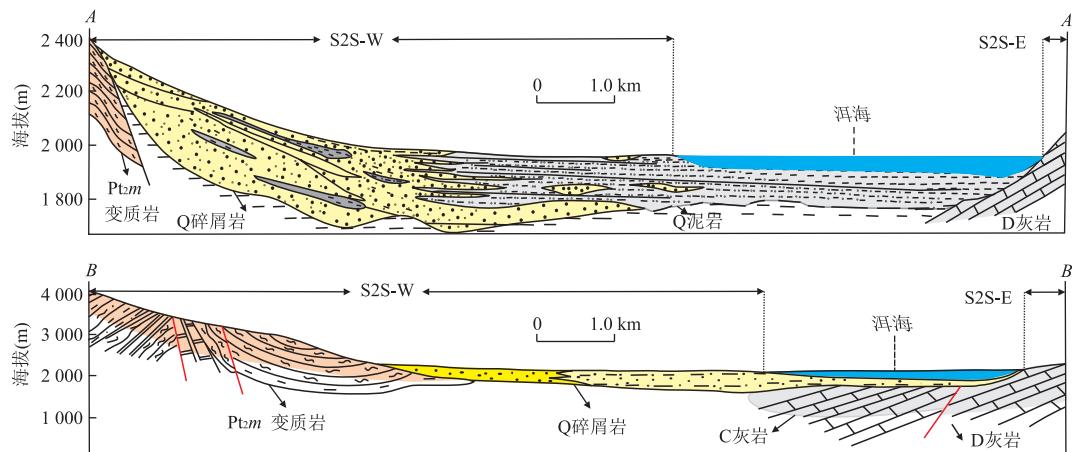


图 5 洱海现代湖盆东、西两岸源—汇系统剖面

Fig.5 Sections of S2S-W and S2S-E for the western and eastern parts of the modern Lake Erhai basin
剖面位置见图 3

2.2.3 源—汇系统耦合关系 S2S-E 主要岩性为抗侵蚀能力较强的碳酸盐岩, 其对应的流域面积较小, 分别为 12.8 km^2 (S2S-E-1)、 19.9 km^2 (S2S-E-2) 和 5.1 km^2 (S2S-E-3); 较低的年均降雨量、单一的植被类型以及水系发育较少等特点导致气候偏于干旱; 物源区与沉积区地形高差较小(约 800 m)、坡度平缓(约 3°) (图 5); 这些因素导致 S2S-E 沉积区几乎无明显的大型沉积体发育, 发育的沉积体也往往具有“小而孤立”的特点, 且面积普遍低于 10 km^2 , S2S-E-1、S2S-E-2、S2S-E-3 三个子系统沉积体面积分别为 1.1 km^2 、 9.5 km^2 、 1.5 km^2 。

2.3 S2S-N

2.3.1 物源区特征 北岸鸡足山二叠系乌龙坝组角砾岩、玄武岩、凝灰岩(图 2)、三叠系砂岩、玄武岩(文中未标)以及西岸的碳酸盐岩是洱海的轴向物源。其流域面积(图 4)、径流量($5.18 \times 10^8 \text{ m}^3$)和输砂量较大。据统计, 弥苴河流域面积和入湖量占到了洱海流域面积和入湖量的 33% (朱海虹, 1989, 1991), 鸡足山平均海拔 $1780\sim3240 \text{ m}$, 垂直高差较大, 具有明显的立体气候特点, 干湿季分明, 夏季凉爽湿润, 冬季寒冷干燥, 气温、降水垂直变化明显。森林覆盖率达 85%, 植被具有地带性分布和垂直分布的完整性特点, 以半湿润常绿阔叶林为主(孟艳芬等, 2008; 苏栋栋等, 2014)。

2.3.2 沉积区特征 洱海北岸弥苴河入湖处形成建设型鸟足状三角洲, 面积较大, 约为 42.8 km^2 (图 4, 图 7)。沉积物主要由细砾、砂和粉砂组成, 以正韵律为主, 亦有少部分表现为逆粒序(周经才, 1987; 朱海虹和姚秉衡, 1989; 朱海虹, 1991; 周江羽等, 2000)。

朱海虹和姚秉衡(1989)、朱海虹(1991)根据钻孔样品分析, 得出弥苴河三角洲沉积平面与垂向序列一致, 依次可分为三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲 3 个沉积单元。周江羽等(2000)通过扇形沉积体生长过程的动力学机制研究, 将洱海弥苴河三角洲定义为均匀对称生长模型, 并指出在这种模型中, 沉积体的生长具有一个主生长轴(生长中心), 并围绕这一生长轴向两侧近似均匀对称生长, 其生长过程具有一定的规律性。

2.3.3 源—汇系统耦合关系 S2S-N 的主要岩性为角砾岩、砂岩和少量的碳酸盐岩, 是洱海的轴向物源, 对应的流域面积较大, 约为 133.1 km^2 (图 4, 图 7); 较高的年均降雨量、较高的森林覆盖率以及水系发育规模大(弥苴河和罗时江)等特点导致本区气候偏于湿润; 搬运通道(河流)沿盆地主构造方向发育, 其流域面积、径流量和输砂量较大; 这些因素导致 S2S-N 沉积区形成较大的沉积体(鸟足状三角洲), 面积约为 42.8 km^2 。

3 洱海源—汇系统差异性

3.1 东、西两岸源—汇系统差异

洱海东、西两岸源—汇系统特征存在明显的差异性, 可以体现在物源区母岩类型、流域面积和沉积区边界样式、沉积体大小、性质关系等方面(图 6)。

3.1.1 东、西两岸物源区母岩类型及其流域面积

西岸: 出露岩性主要为变质杂岩, 少量花岗岩和碳酸盐岩(图 6), 中部、南部主要广泛出露中元古界的变质杂岩, 在西北部出露少量晋宁、印支期的花岗岩和

源汇系统		西岸(S2S-W)			东岸(S2S-E)	北岸(S2S-N)
		S2S-W-1	S2S-W-2	S2S-W-3		
组成单元	源	母岩类型	变质岩	变质岩、花岗岩	变质岩、碳酸盐岩	碳酸盐岩
		流域面积(km^2)	161.5	34.9	19.6	5.1~19.9
	渠	高差(m)	$(1.5\sim 2.0)\times 10^3$			$(0.5\sim 0.8)\times 10^3$
		类型	山涧溪流	山涧溪流	山涧溪流	山前短溪流
		数目	多(1条)	少(1条)	少(2条)	少(约3条)
		长度(km)	3.3~9.3	11.7	5.2~5.6	1.9~11.3
	汇	宽度(m)	3.1~6.3	5.3	4.6~5.9	4.2~5.1
		坡降(°)	约10°	8.5°	10°	2.8°
控制因素	控制因素	沉积体系类型	大型洪-冲积扇裙			小型扇体
		扇体面积(km^2)	40~50	18.1	9.9	1.1~9.5
		母岩类型	主控因素			主控因素
		构造活动	主控因素			次控因素
		气候因素	次控因素			次控因素
		地貌	次控因素			次控因素
		水系发育	主控因素			次控因素
						主控因素

图 6 洱海现代湖盆西岸(S2S-W)、东岸(S2S-E)和北岸(S2S-N)源—汇系统要素及控制因素差异对比

Fig.6 Correlation of the S2S-W, S2S-E, and S2S-N for the western, eastern, and northern parts of the modern Lake Erhai basin

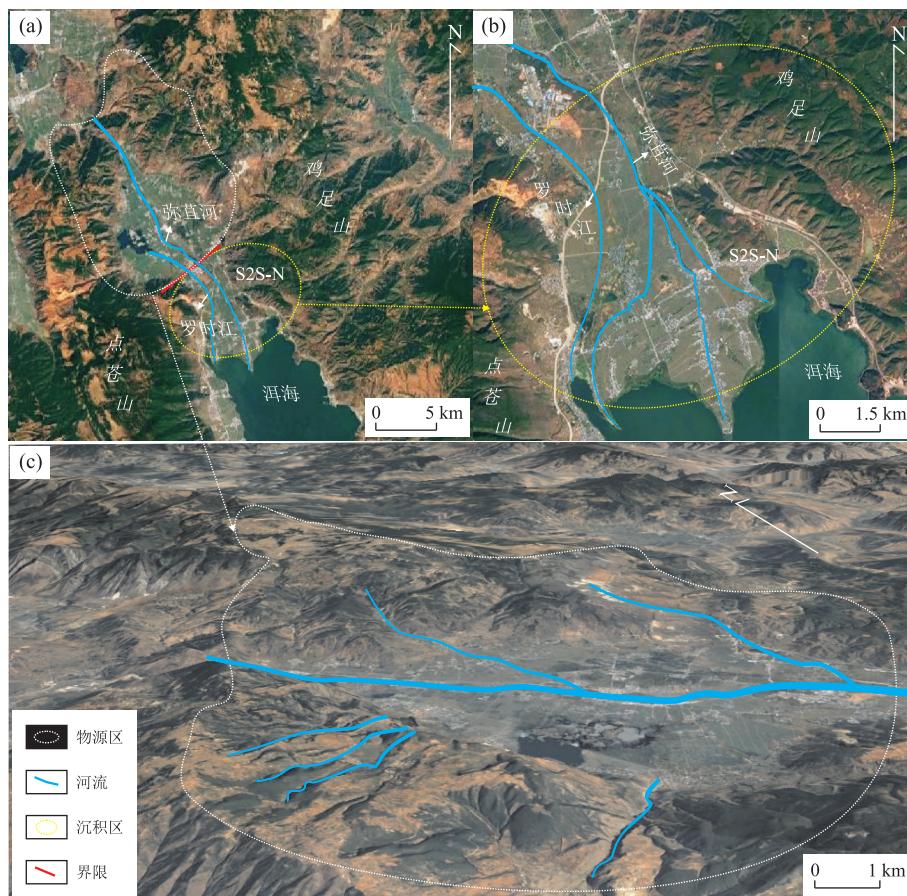


图 7 洱海现代湖盆北岸源—汇系统(S2S-N)特征

Fig.7 Characteristics of S2S-N for the northern part of the modern Lake Erhai Basin

志留系的灰岩、白云岩(图 2);不同母岩供源区对应的流域面积不同,变质岩母岩供源区流域面积最大,

约 161.5 km^2 ;花岗岩、变质岩混合供源区面积次之,约 34.9 km^2 ;碳酸盐岩供源区面积最小,约 19.6 km^2

(图 6).东岸:出露岩性主要为碳酸盐岩(图 6),从南向北依次出露泥盆系青山组灰岩、石炭系斗项山组白云质灰岩、二叠系茅口组灰岩夹角砾状灰岩、志留系五福山组白云岩、青山组灰岩以及莲花山组白云岩(图 2);对应的流域面积较小,约 $5.1\sim19.9 \text{ km}^2$ (图 6).

由上述可知,东、两岸物源区母岩类型不同,对应的流域面积也不同.东岸碳酸盐岩母岩区的流域面积普遍低于西岸变质岩母岩区和变质岩及花岗岩混合母岩区的流域面积,而与西岸碳酸盐岩母岩区流域面积相近(图 6).

3.1.2 边界条件及地形坡度、高差 西岸:断裂陡坡带,地形高差大(约 2 000 m)、坡度大(约 10°),水系多为近源、流急的间歇性溪流,沉积作用多表现事件性,往往由密度流形成洪积扇—扇三角洲体系(图 6).东岸:无断裂体系控制,地形高差小(约 800 m)、平缓斜坡(3°),沉积体往往发育不明显(图 6);东、两岸碳酸盐供源形成的沉积体,虽然面积相近($<10 \text{ km}^2$),但是由于处于不同的边界条件控制下,西岸坡度大、盆缘断裂,而东岸坡度小、无断裂,因此沉积体特征存在一定差异,东岸呈现“粒度细、厚度薄”的特征,而西岸则呈现“厚度大、粒度粗”的特征.

3.1.3 搬运通道特征 西岸:搬运通道以山间溪流(苍山 18 溪)为主,成片分布,形成了长约 40 km、宽约 5.6 km 的流域面积;单条河流宽度相近,约 5 m,弯度介于 1.0~1.1(图 3,图 4,图 6).东岸:河流相对不发育,以山前短河流(向阳沟、玉龙河及海潮河)为主(图 3),彼此孤立分布,相应地流域面积也较小;但单条河流的宽度、弯度与西岸溪流相近(图 4).

3.1.4 沉积区沉积体规模 由图 3、图 4 和图 6 可知,西岸的沉积体面积明显大于东岸,且两者具有不同的分布特点.

西岸:整体表现为大型沉积体彼此“相互叠置、带状分布”的特征.同一断裂、不同母岩类型控制下形成的沉积体面积具有明显的差异:碳酸盐岩母岩区沉积体面积(9.9 km^2)明显小于变质岩、花岗岩混合母岩区(18.1 km^2)和变质岩母岩区的面积(134.4 km^2),其中变质岩母岩区沉积体面积又可以根据叠置状况分为 3 个沉积体,面积分别为 43.8 km^2 、 48.5 km^2 、 42.1 km^2 (图 4),与北缘轴向物源形成的沉积体面积(42.8 km^2)相近.东岸:整体表现为小型沉积体“孤立分布”的特征.沉积体数量及规模相对不发育,发育 3 个小型沉积体,且面积普遍小于 10 km^2 ,分别为 1.1 km^2 、 9.5 km^2 、 1.5 km^2 ,但

与西岸碳酸盐岩母岩区形成的沉积体面积相近,充分印证了母岩类型的控制作用.

3.2 北岸与东、两岸源—汇系统差异

北岸源—汇系统是典型的陆相湖盆轴向物源控制下的源—汇系统,其源—汇特征更加明显.轴向物源是陆相盆地重要的物源类型,尤其是狭长分布的陆相盆地,轴向物源对湖盆沉积充填控制作用更为明显,这一点在洱海源—汇系统中也非常典型.

北岸“鸡足山—洱海”轴向源—汇系统整体表现为“物源大、运距长、扇体大”的特征.物源大指流域面积大,约 133.1 km^2 ;运距长指搬运距离长,搬运通道弥苴河、罗时江等沿盆地主构造方向发育,主河道长度分别约 56.2 km、20.1 km;扇体大指沉积体(三角洲)的面积较大,约 42.8 km^2 (图 6).与北岸源—汇系统沉积体面积大形成对比,东岸碳酸盐岩供源区、西岸变质岩及花岗岩混合供源区和西岸碳酸盐岩供源区对应形成的沉积体规模相对较小,普遍低于 20 km^2 (图 4,图 6);虽然西岸变质岩供源区形成的沉积体,单个面积与北岸相近,但其搬运通道多以小型溪流(主水道长度 10 km 左右)为主,且数量明显较多(图 3).

4 洱海源—汇系统差异性控制因素探讨

构造活动、古地貌、盆地边界条件、母岩类型、搬运通道、气候等因素直接影响源—汇系统特征,同时这些因素之间也存在一定的关联性,比如母岩类型和构造活动均对地貌地形、水系以及植被分布产生一定的影响.

4.1 物源区母岩类型

陆相盆地母岩类型主要包括碎屑岩类、碳酸盐岩类、变质岩类及岩浆岩类(花岗岩类).其中母岩的机械性质、坚实性、渗透性、矿物组成和化学性质等,会直接影响成土过程的速度和方向(赖发叶,1989).母岩种类不同,风化程度、成土过程的速度和方向、侵蚀方式、侵蚀强度及侵蚀速率也不一样.

碳酸盐岩母岩相对于其他岩类具有一定特殊性.主要表现为:(1)岩石分布区多为基岩裸露区,表土(沉积物和溶解物)以少量风化残积红壤或红壤夹碎石的形式存在于溶穴或溶沟中;(2)母岩成土过程缓慢(侵蚀强度低、侵蚀速率大),以喀斯特作用为主(王世杰,2002;莫源富和奚小双,2010);(3)可溶性强,碳酸盐岩中酸不溶物含量极低(李明琴等,2005),碳酸盐类矿物易被溶解(冯志刚等,2009),加

之地下河和岩溶大泉发育,富水性强,碳酸盐岩风化物往往以溶解物的方式被地下水带走(杨立铮,1985;裴建国等,2008),只有少量的难溶粘土矿物和石英等残留下来(李明琴等,2005;冯志刚等,2009).其他岩类,特别是花岗岩类,对应风化壳深厚且抗侵蚀力相对较弱(侵蚀强度高),侵蚀方式以面蚀、沟蚀和崩塌侵蚀为主,母岩表层砂砾含量高(阮伏水和周伏建,1995),供源有效性较碳酸盐岩母岩强.因此同等条件下碳酸盐岩母岩的物源供给量小,形成沉积体规模小、数量少(图 3).

同时,母岩类型还控制侵蚀区流域单元的空间分布(杨春艳等,2016),即影响地形、地貌、水系(物源搬运通道)及植被分布,进而影响沉积体规模、数量.东岸碳酸盐岩母岩区地形高差小(平缓斜坡),水系分布不显著,植被稀疏,相应的沉积体的规模小、数量少;而西岸变质岩、花岗岩母岩区常对应有“地形高差大(陡峭断层或断坡)、多级水系交汇叠置、主水系显著、植被类型丰富”等特征,对应沉积体的规模大、数量多.

4.2 构造活动差异

勘探实践和前人的研究成果表明,边界断裂对断陷湖盆的形成及其沉积体系的分布具有重要的影响(康海亮等,2016).盆地控边断层一般发育规模较大,延伸距离较远(章慧等,2016),对沉积体系的控制作用主要体现在水平方向上的拉张所引起的垂向运动.而垂向运动对沉积作用的控制,则往往表现为盆地最大的沉积厚度不在盆地中心而偏向主断裂一侧(朱海虹和姚秉衡,1989;朱海虹,1991),因而造成盆地内不同位置的沉积体系的类型(洪/冲积扇、扇三角洲及三角洲等)及规模的不同.

洱海东西两岸沉积区边界条件明显不同.西岸以洱海断裂与点苍山为界,呈正断层构造接触关系.该断裂沿湖盆边界分布,规模较大、延伸距离较远(约为 50 km),是洱海(长约 41.2 km)断陷湖盆的一条重要的控边断裂.晚新生代以来,洱海盆地随着西侧点苍山的强烈隆起,盆地凹陷中心偏向于湖盆西侧,使得遭受左行韧性剪切的变质岩经风化侵蚀后由河流搬运至西岸沉积(朱海虹和姚秉衡,1989;万晔等,2005).该区大规模的山麓洪积扇和扇三角洲十分活跃,也印证了盆地控边断层对盆地沉积中心的控制作用.而东岸为稳定的扬子地台,几乎不受断裂活动的影响,相应地沉积体相对不发育.

其次,构造活动差异引起地貌特征的不同,尤其是盆地物源区高差的不同,也是造成盆地两侧沉

积体发育规模不同的原因.洱海盆地西侧为点苍山,地形高差大(约 2 000 m)、坡度陡(约 10°),发育有一系列的断层三角面(李宝龙等,2012);而东侧玉案山与洱海的地形高差较小(约 500 m)、坡度缓(约 3°)表现为山地地貌与湖泊地貌的平缓过渡.

除此之外,边界断裂对沉积体的影响也体现在对搬运通道(河流)的控制作用.河流往往是湖盆中物质侵蚀和搬运的主要营力,而沿断裂及其破碎带有利于河流的发育(朱海虹和姚秉衡,1989;朱海虹,1991).顺盆地主要构造方向形成的水系,其流域面积、径流量和输砂量较大,因此,在盆地长轴方向的两端往往形成较大的沉积体.例如洱海盆地北部弥苴河,每年径流量达到 $5.18 \times 10^8 \text{ m}^3$,占据了总入湖量的 33%,相应地,该处发育有鸟足状三角洲(朱海虹和姚秉衡,1989),面积达 42.8 km^2 ,该三角洲地处盆地长轴方向的中轴线上,河流及其分支呈指状快速向湖区推进.垂直断裂及破碎带的方向,陡坡带往往具有“地形高差大(陡峭断层或断坡)、多级水系交汇叠置”的特征.例如西岸断裂陡坡带(坡度大,盆缘断裂)控制下水系多为近源、流急的间歇性溪流,沉积作用多表现事件性,往往由密度流形成洪积扇—扇三角洲体系,变质岩供源区形成的单个沉积体面积与北岸相近,约为 40 km^2 .

4.3 气候因素

气候是指某一地区多年时段大气的一种状态,主要包括气温、降水以及蒸发量等.气候通过影响河流径流量及输砂量等控制入湖的沉积物供应量,从而影响沉积区沉积体系的类型及规模(Liu and Cui, 2011).一方面,气温上升可以通过改变气团的热量动力特征和水分传输从而加强局部降水(Zhou and Huang, 2010; Trenberth *et al.*, 2011; 田清, 2016);另一方面,相对于降水量,径流量对气温上升造成蒸发量增加的响应比较缓慢(Wagener *et al.*, 2005; Dai *et al.*, 2009a),因此本文主要讨论气温和降水量对沉积体系的控制作用.洱海流域 1961—2010 年气温变化表明,洱海流域历年平均气温约为 14.6°C ,年平均最高、最低气温分别约为 15.5°C 、 13.9°C ,分别出现在 2005、1992 年(黄慧君等,2013).多年平均气温变幅为 2.6°C ,且盆地中不同区域之间气温变化幅度 $<1^\circ\text{C}$,因此,同一个盆地可以认为气温条件相同,其对沉积体的影响可以忽略不计.而有关降水量的研究表明,我国流域系统中,大约一半的年降水量可以转化为径流(Lu, 2004),降水量的变化可能是导致河流径流量及输砂量加倍变化的最主要原因(Shi

et al., 2012). 相比于东侧玉案山(海拔约 2 400 m)物源区, 西侧点苍山物源区海拔更高(约 3 500 m), 山地垂直气候带明显(苏锦兰等, 2015), 因此西岸多年降水量多于东侧, 而多年降水量的差异或许是造成东、西两岸沉积体系特征不同的原因。

4.4 水系发育差异

河流作为源—汇系统中的搬运通道, 其径流量、输砂量的大小与其发育规模(数目、长度、宽度、流域面积)密切相关。大型河流规模较大、长期侵蚀、搬运能力强, 径流量、输砂量较大, 故常在其出口处发育大型沉积体系; 而小型河流规模较小、变道频繁、疏导能力弱, 往往对应为小型沉积体系(刘强虎等, 2015); 但是当小型河流数目较多时, 整体有效供源面积大, 也往往形成大型沉积体系。由图 3 和图 4 可知, 洱海东、西、北 3 岸河流发育数目、长度、流域面积存在一定差别, 对应形成的沉积体面积也存在一定差异:(1)洱海西岸发育有苍山 18 溪(图 3), 其中, 霞移溪对应碳酸盐岩供源区(S2S-W-3), 有效供源长度为 7.5 km, 河流宽度约 5.6 m, 流域面积为 14.4 km², 对应形成的沉积体面积为 9.9 km²; 万花溪对应变质岩和花岗岩混合供源区(S2S-W-2), 有效供源长度为 19.1 km, 宽度为 5.3 m, 流域面积为 34.9 km², 对应形成的沉积体面积为 18.1 km²; 其他溪流则对应变质岩供源区(S2S-W), 流域面积为 161.6 km², 河流平均宽度约 5.1 m, 对应形成的沉积体面积为 134.4 km²;(2)东岸发育河流较少, 主要有 3 条河流: 向阳沟(S2S-E-1)、海潮河(S2S-E-2)和玉龙河(S2S-E-3), 分别对应于 12.8 km²、19.9 km²、5.1 km² 的流域面积, 相应的沉积体面积较小, 分别为 1.1 km²、9.5 km²、1.5 km²;(3)北岸(S2S-N)发育两条大型河流: 弥苴河和罗时江, 有效供源长度分别为 56.2 km 和 20.1 km, 宽度分别为 8.8 m 和 5.6 m, 流域面积大于 133.1 km², 对应形成的沉积体面积为 42.8 km²。

由上述可知, 西岸河流众多、整体有效供源面积大, 北岸河流虽少, 但单个规模大, 整体有效供源面积也大, 因此两岸对应的沉积体相应较大; 而东岸河流数量少、规模小, 因此沉积区形成的沉积体较小(图 3, 图 4, 图 7)。

5 结论

(1) 洱海现代湖盆存在 3 个独立的源—汇系统(S2S), 分别为西岸“点苍山—洱海”断裂陡坡(约

10°)源—汇系统(S2S-W)、东岸“玉案山—洱海”无断裂缓坡(<3°)源—汇系统(S2S-E)和北岸“鸡足山—洱海”轴向源—汇系统(S2S-N)。

(2) S2S-W、S2S-E、S2S-N 三个源—汇系统特征存在明显的差异性, 东岸源—汇系统(S2S-E)物源区母岩主要为碳酸盐岩, 沉积区沉积体相对不发育, 数量少、规模小(<10 km²), 主要以孤立分布的沉积体为主; 西岸源—汇系统(S2S-W)物源区母岩主要为变质岩及少量花岗岩、碳酸盐岩, 沉积区沉积体数量多、相互叠置、连片分布, 规模大(>40 km²); 北岸源—汇系统(S2S-N)为典型的轴向物源型源—汇系统, 物源区母岩主要为碎屑岩, 沉积物供应充足, 沉积区形成大型沉积体。

(3) 洱海源—汇系统特征差异性的控制因素主要有母岩类型、构造活动、气候、古地貌、盆地边界条件、搬运通道等, 其中母岩类型是造成 S2S-W、S2S-E 和 S2S-N 源—汇系统中流域面积、沉积体面积及沉积响应差异的共同的主控因素; 除此之外, S2S-W 受构造活动及搬运通道的影响明显; S2S-N 受搬运通道的影响明显。

(4) 现代湖盆源—汇系统分析结果表明, 同一盆地(洼陷)内可以存在多个源—汇系统, 且不同源—汇系统之间可能存在差异性, 在古代源—汇系统研究中需要重视不同源—汇系统之间的差异性研究。

References

- Allen, P. A., 2005. Striking a Chord. *Nature*, 434(7036): 961.
- Allen, P. A., 2008a. From Landscapes into Geological History. *Nature*, 451: 274—276.
- Allen, P. A., 2008b. Time Scales of Tectonic Landscapes and Their Sediment Routing Systems. *Geological Society London Special Publications*, 296(1): 7—28. doi: 10.1144/SP296.2.
- Allen, P. A., Densmore, A. L., 2000. Sediment Flux from an Uplifting Fault Block. *Basin Research*, 12: 367—380.
- Allen, P. A., Hovius, N., 1998. Sediment Supply from Landslide-Dominated Catchments: Implications for Basin-Margin Fans. *Basin Research*, 10: 19—35.
- Chen, A. D., Gu, J. N., Zhao, Z. Z., et al., 2016. Quartz Grains SEM Surface Microtextures of Quaternary Glacier Sediments along the Diancang Mountain in Yunnan, Southwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 38(2): 453—462 (in Chinese with English abstract). doi: 10.7522/J.Issn.1000-0240.2016.0051.
- Dai, A., Qian, T. T., Trenberth, K. E., et al., 2009a. Change in Continental Freshwater Discharge from 1948 to 2004.

- Journal of Climate*, 22:2773–2792.
- Dearing, J.A., Jones, R.T., 2003. Coupling Temporal and Spatial Dimensions of Global Sediment Flux through Lake and Marine Sediment Records. *Global Planet. Change*, 39:147–168.
- Dearing, J.A., Jones, R.T., Shen, J., et al., 2008. Using Multiple Archives to Understand Past and Present Climate-Human-Environment Interactions: The Lake Erhai Catchment, Yunnan Province, China. *Journal of Paleolimnology*, 40:3–31. doi:10.1007/s10933-007-9182-2
- Ding, W.R., 2016. A Study on the Characteristics of Climate Change around the Erhai Area, China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 25(4):599–605 (in Chinese with English abstract). doi: 10.11870/cjlyyyhj201604009
- Feng, Z.G., Wang, S.J., Liu, X.M., et al., 2009. Impact of Acid-Insoluble Residua of Carbonate Rocks on Developing Intensities of Their Weathering Crusts. *Acta Geologica Sinica*, 83(6):886–893 (in Chinese with English abstract).
- Galloway, W.E., 2001. Cenozoic Evolution of Sediment Accumulation in Deltaic and Shore-Zone Depositional Systems, Northern Gulf of Mexico Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 18:1031–1040. doi:18(2001)1031–1040
- Galloway, W.E., Ganey-Curry, P.E., Li, X., et al., 2000. Cenozoic Depositional History of the Gulf of Mexico Basin. *AAPG Bulletin*, 84:1743–1774.
- Gong, W., Jiang, X.D., 2017. Thermal Evolution History and Its Genesis of the Ailao Shan-Red River Fault Zone in the Ailao Shan and Day Nui Con Voi Massif during Oligocene-Early Miocene. *Earth Science*, 42(2):223–239 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2017.017
- Gu, J.N., Chen, A.D., Zhao, Z.Z., et al., 2016. Quaternary Glacial Deposits Features and Its OSL Dating in Mt. Cangshan Global Geopark of Dali, Yunnan Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(6):769–778 (in Chinese with English abstract). doi:10.3975/cagsb.2016.06.12
- Huang, H.J., Wang, Y.P., Li, Q.H., 2013. Climatic Characteristics over Erhai Lake Basin in the Late 50 Years and the Impact on Water Resources of Erhai Lake. *Meteorological Monthly*, 39(4):436–442 (in Chinese with English abstract). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.005
- Kang, H.L., Lin, C.S., Liu, X., et al., 2016. Syndepositional Fault Control on Types and Distribution of Depositional System and Lithologic Trap of Dongying Formation in the North of Nanpu Sag. *Geoscience*, 30(2):286–293 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, M.S., Xie, S.Y., Zeng, Y., et al., 2002. Study on the Palaeovegetation and Palaeoclimate since Late Pleistocene in the Diancang Mountain Area in Dali of Yunnan Province. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 27(5):759–765 (in Chinese with English abstract).
- Leloup, P. H., Harrison, T. M., Ryerson, F. J., et al., 1993. Structural Petrological and Thermal Evolution of a Tertiary Ductile Strike-Slip Shear Zone Diancang Shan, Yunnan. *Journal of Geophysical Research*, 98(B4):6715–6743.
- Lai, F.Y., 1989. Relationship between Bedrock Lithology and Soil Erosion. *China Soil and Water Conservation*, 7:41–43 (in Chinese).
- Li, B.L., Ji, J.Q., Luo, Q.H., et al., 2012. The Structural Style and Timing of Uplift of the Ailaoshan-Diancang Range, West Yunnan, China. *Seismology and Geology*, 34(4):697–709 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2012.04.013
- Li, K., Liu, E.F., Zhang, E.L., et al., 2017. Historical Variations of Atmospheric Trace Metal Pollution in Southwest China: Reconstruction from a 150-Year Lacustrine Sediment Record in the Erhai Lake. *Journal of Geochemical Exploration*, 172:62–70. doi:10.1016/j.gexplo.2016.10.009
- Li, M.Q., Zhang, Z.R., Wang, Z.Y., et al., 2005. Tracing the Pedogenic Process to Carbonate Rocks in Light of Maceral and Microfabric Characteristics of Clay and Carbonate Rocks: A Case Study of Dashandong at Guiyang Rock-Clay Profile. *Earth and Environment*, 33(4):77–82 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.T., 2015. Advance, Trend and New Challenges in Basin Geodynamics. *Earth Science Frontiers*, 22(1):1–8 (in Chinese with English abstract). doi: 10.13745/j.esf.2015.01.001.
- Li, S.H., Deng, C.L., Paterson, G.A., et al., 2014. Tectonic and Sedimentary Evolution of the Late Miocene-Pleistocene Dali Basin in the Southeast Margin of the Tibetan Plateau: Evidences from Anisotropy of Magnetic Susceptibility and Rock Magnetic Data. *Tectonophysics*, 629:362–377. doi:10.1016/j.tecto.2014.05.035
- Liu, Q.H., Cui, B., 2011. Impacts of Climate Change/Variability on the Stream Flow in the Yellow River Basin, China. *Ecological Modelling*, 222:268–274.
- Liu, Q.H., Zhu, H.T., Shu, Y., et al., 2015. Provenance Systems and Their Control on the Beach Bar of Paleogene Enping Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(3):286–299 (in Chinese with English abstract). doi:10.7623/syxb201503004

- Liu, Q. H., Zhu, X. M., Li, S. L., et al., 2016. Pre-Palaeogene Bedrock Distribution and Source-to-Sink System Analysis in the Shaleitian Uplift. *Earth Science*, 41(11): 1935—1950 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2016.134
- Liu, J. L., 2012. The Development and Landscape Application of Wild Flower Resources in Kunming, Yuan Mountain. *Modern Gardening*, (8): 197—198 (in Chinese with English abstract). doi: 10.1405/j.cnki.xddy.2012.08.096
- Lu, H. B., Chen, G. J., Cai, Y. F., et al., 2016. Cladoceran Community Responses to Eutrophication, Fish Introduction and Macrophyte Degradation over the Past Century in Lake Erhai. *Journal of Lake Science*, 28(1): 132—140 (in Chinese with English abstract). doi: 10.18307/2016.0115
- Lu, X. X., 2004. Vulnerability of Water Discharge of Large Chines Rivers to Environmental Changes: An Overview. *Regional Environmental Change*, 4: 182—191.
- Luo, R. J., Wu, Z. H., Huang, X. L., 2015. The Main Active Faults and the Active Tectonic System of Binchuan Area, Northwestern Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 34(1): 155—170 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Y. F., Guo, X. G., Qian, T. J., 2008. Investigation on Ecotoparasitic Sucking Lice on Small Mammals in Jizu Mountain, Yunnan. *Journal of Pathogen Biology*, 3(7): 531—533 (in Chinese with English abstract). doi: 10.13350/j.cjpb.2008.07.002
- Mo, Y. F., Xiao, X. S., 2010. Carbonate Rock Lithological Distribution by Remote Sensing Data for Areas with Flourishing Vegetation. *Journal of Guilin University of Technology*, 30(1): 41—46 (in Chinese with English abstract).
- Pei, J. G., Liang, M. Z., Chen, Z., 2008. Classification of Karst Groundwater System and Statistics of the Main Characteristic Values in Southwest China Karst Mountain. *Carsologica Sinica*, 27(1): 6—10 (in Chinese with English abstract).
- Peng, G., Jiao, W. Q., 1991. Radiocarbon Dating of Late Quaternary Sediments in Erhai Lake Basin of Dali Area and Evolution of the Erhai Lake. *Seismology and Geology*, 13(2): 179—183 (in Chinese with English abstract).
- Royden, L. H., Burchfiel, B. C., King, R. W., et al., 1997. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet. *Science*, 276: 788—790.
- Ruan, F. S., Zhou, F. J., 1995. Several Key Problems about Rebuilding Vegetation on Eroded Granite Slope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 9(2): 19—25 (in Chinese with English abstract).
- Shi, C., Zhou, Y., Fan, X., et al., 2012. A Study on the Annual Runoff Change and Its Relationship with Water and Soil Conservation Practices and Climate Change in the Middle Yellow River Basin. *Catena*, 100: 31—41.
- Shen, J., Jones, R. T., Yang, X. D., et al., 2006. The Holocene Vegetation History of Lake Erhai, Yunnan Province Southwestern China: The Role of Climate and Human Forcings. *Holocene*, 16: 265—276.
- Socquet, A., Pubellier, M., 2005. Cenozoic Deformation in Western Yunnan (China-Myanmar Border). *Journal of Asian Sciences*, 24: 495—515. doi: 10.1016/j.jseas.2004.03.006
- Sømme, T. O., Helland-Hansen, W., Martinsen, O. J., et al., 2009a. Relationships between Morphological and Sedimentological Parameters in Source-to-Sink Systems: A Basis for Predicting Semi-Quantitative Characteristics in Subsurface Systems. *Basin Research*, 21(4): 361—387. doi: 10.1111/j.1365-2117.2009.00397.X
- Sømme, T. O., Jackson, C. A. L., 2013a. Source-to-Sink Analysis of Ancient Sedimentary Systems Using a Subsurface Case Study from the Møre-Trondelag Area of Southern Norway: Part 2—Sediment Dispersal and Forcing Mechanisms. *Basin Research*, 25(5): 512—531.
- Sømme, T. O., Jackson, C. A. L., Vaksdal, M., 2013b. Source-to-Sink Analysis of Ancient Sedimentary Systems Using a Subsurface Case Study from the Møre-Trondelag Area of Southern Norway: Part 1—Depositional Setting and Fan Evolution. *Basin Research*, 25(5): 489—511. doi: 10.1111/bre.12014
- Sømme, T. O., Martinsen, O. J., Thurmond, J. B., 2009b. Reconstructing Morphological and Depositional Characteristics in Subsurface Sedimentary Systems: An Example from the Maastrichtian-Danian Ormen Lange System, Møre Basin, Norwegian Sea. *AAPG Bulletin*, 93(10): 1347—1377. doi: 10.1306/0601090938
- Su, D. D., Wu, Z. L., Gao, J. Y., et al., 2014. Comparison of Understory Bird Communities in Evergreen Broadleaved Forests of Daweishan and Jizushan, Yunnan, China. *Chinese Journal of Ecology*, 33(1): 132—140 (in Chinese with English abstract).
- Su, J. L., Li, J., Yang, G. R., et al., 2015. Comparative Analysis Hourly Precipitation Features on the East and West Sides of Yunling Diancang Mountain in Hengduan Mountains. *Meteorological Monthly*, 41(1): 17—24 (in Chinese with English abstract).
- Tapponnier, P., Lacassin, R., Leloup, P. H., et al., 1990. The Ailao Shan/Red River Metamorphic Belt: Tertiary Left-Lateral Shear between Indochina and South China. *Nature*, 343(1): 431—437.
- Tian, Q., 2016. Impacts of Climate Change and Human Activ-

- ity on the Water and Sediment Flux of the Yellow, Yangtze and Pearl River Basins Over the Past 60 Years (Dissertation).East China Normal University, Shanghai (in Chinese with English abstract).
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., Mackaro, J., 2011. Atmospheric Moisture Transports from Ocean to Land and Global Energy Flows in Reanalyses. *Journal of Climate*, 24:4907—4924.
- Wagener, T., Liu, Y., Gupta, H. V., et al., 2005. Regional Hydrological Impacts of Climate Change: Impact Assessment and Decision Making. IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, UK, 163.
- Wan, Y., Han, T.D., Duan, C.Q., et al., 2005. Landform System Structures and Characteristics of the Diancang Mountain Areas in West Yunnan Province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(2):241—248 (in Chinese with English abstract).
- Wang, E., Burchfiel, B.C., Royden, L.H., et al., 1998. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang, Red River, and Dali Fault Systems of Southwestern Sichuan and Central Yunnan, China. *Geological Society of American, Special Paper*, 327:1—108.
- Wang, E.Q., Fan, C., Wang, G., et al., 2006. Deformational and Geomorphic Progresses in the Formation of the Ailaoshan-Diancang Range, West Yunnan. *Quaternary Sciences*, 26 (2):220—228 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S.J., 2002. Concept Deduction and Its Connotation of Karst Rocks Desertification. *Carsologica Sinica*, 21(2): 101—105 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. L., Jiang, G. Q., Zhou, W., et al., 2016. TMDL of Lake Erhai Based on Water Ecological Features. *Journal of Lake Sciences*, 28(2):271—280 (in Chinese with English abstract).doi:10.18307/2016.0205
- Wang, X. H., Yu, S., Huang, G. H., 2004. Land Allocation Based on Integrated GIS-Optimization Modeling at a Watershed Level. *Landscape and Urban Planning*, 66: 61—74.doi:10.1016/S0169-2046(03)00095-1
- Xu, C.H., Du, X.F., Xu, W., et al., 2017. New Advance of the “Source-to-Sink” System Research in Sedimentary Basin. *Oil and Gas Geology*, 38(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Zhou, X.Y., Lan, J.H., et al., 2015. Late Holocene Indian Summer Monsoon Variations Recorded at Lake Erhai, Southwestern China. *Quaternary Research*, 83: 307—314.doi:10.1016/j.yqres.2014.12.004
- Xu, L.J., Liu, Z. H., Cao, J., 2014. Numerical Simulation of Local Circulation over the Cangshan Mountain-Erhai Lake Area in Dali, Southwest China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 38(6):1198—1210 (in Chinese with English abstract).doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13293
- Yang, C.Y., Yang, G.B., Chen, Z.H., 2016. Analysis of Vegetation Cover under the Background of Different Lithology Characteristics in the Mountainous Area in Southwest of China—A Case Study of Panxian. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 34 (6):1—7 (in Chinese with English abstract).doi:10.16614/j.cnki.issn1004-5570.2016.06.001.
- Yang, L. Z., 1985. Distribution of Subterranean Rivers in South China. *Carsologica Sinica*, 4(1—2):92—100 (in Chinese with English abstract).
- You, M.Y., Qin, R.G., Cao, G.Z., et al., 2016. Heterogeneous Distribution of the Aquifer Sediments in an Alluvial Fan of Dali, Yunnan. *Geology and Exploration*, 52 (4): 734—742 (in Chinese with English abstract).doi:10.13712/j.cnki.dzyki.2016.04.015
- Zhao, C.Q., Zhao, L., Cao, S.Y., et al., 2014. Cenozoic Deformation-Metamorphic Evolution of the Diancang Shan Metamorphic Complex and Regional Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (3): 852—866 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H.C., Wang, S.R., Jiao, L.X., et al., 2013. Characteristics of Composition and Spatial Distribution of Organic Matter in the Sediment of Erhai Lake. *Research of Environmental Sciences*, 26 (3): 243—249 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Sun, S. M., Ji, H. C., et al., 2016. Segmentation Characteristic of Boundary Fault in Nanpu Sag and Its Control on Sedimentary System. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 23 (3): 20—25 (in Chinese with English abstract).doi:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2016.03.004
- Zhang, Q., Wan, Y., Zeng, H. Y., 2016. Progress, Discuss and Prospects of Dali Glaciation on Massif Diancang. *Yunnan Geographic Environment Research*, 28(1):22—29 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.J., Qi, Q.J., Wang, S.R., et al., 2011. Effects of Organic Matter, Manganese and Iron on Phosphorus Fractions and Release in the Sediments of Erhai Lake. *Research of Environmental Sciences*, 24(4):371—378 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. C., 1987. Investigation on Modern Sediments of Fault Lakes in Yunnan Province. *Xinjiang Petroleum Geology*, 8(1):60—63(in Chinese).
- Zhou, Y. T., Huang, R. H., 2010. Interdecadal Variability of Summer Rainfall in Northwest China and Its Possible

- Causes. *International Journal of Climatology*, 30: 549—557.
- Zhou, J.Y., Wu, C.L., Li, X., et al., 2000. Dynamic Mechanism and Fractal Simulation of Growth Process of Fan-Shaped Sedimentary Bodies. *Earth Science*, 25(1): 33—38 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H.H., 1991. Formation of Fault Lakes in Yunnan Province, and Its Sediment and Evolution in Lake Cenozoic. *Oceanology et Limnologia Sinica*, 22(6): 509—516 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H.H., Yao, B.H., 1989. Study on the Delta Deposition in Fault Lakes, Yunnan Province, and Its Significance for Petroleum Exploration. *Oil and Gas Geology*, 10(2): 95—106 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H.T., Yang, X.H., Zhou, X.H., et al., 2013. Sediment Transport Pathway Characteristics of Continental Lacustrine Basin Based on 3-D Seismic Data: An Example from Dongying Formation of Western Slope of Bohai Sag. *Earth Science*, 38(1): 121—129 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqks.2013.012
- Zhu, X.M., Zhong, D.K., Yuan, X.J., 2016. Development of Sedimentary Geology of Petroliferous Basins in China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(5): 820—829 (in Chinese with English abstract). doi: 10.11698/PED.2016.05.20
- 赖发叶, 1989. 试论母岩岩性与土壤侵蚀的关系. *中国水土保持*, 7: 41—43.
- 李宝龙, 季建清, 罗清华, 等, 2012. 滇西点苍山—哀牢山隆升构造样式和隆升时限. *地震地质*, 34(4): 697—709.
- 李明琴, 张竹如, 王智勇, 等, 2005. 用岩—土显微特征示踪碳酸盐岩母岩的成土过程——以贵阳市大山洞岩—土剖面为例. *地球与环境*, 33(4): 77—82.
- 李思田, 2015. 沉积盆地动力学研究的进展、发展趋向与面临的挑战. *地学前缘*, 22(1): 1—8.
- 刘强虎, 朱红涛, 舒誉, 等, 2015. 珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组物源体系及其对滩坝的控制. *石油学报*, 36(3): 286—299.
- 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等, 2016. 沙奎田凸起前古近系基岩分布及源—汇过程. *地球科学*, 41(11): 1935—1950.
- 刘江丽, 2012. 昆明玉案山野生花卉资源的开发及园林应用. *现代园艺*, (8): 197—198.
- 卢慧斌, 陈光杰, 蔡燕凤, 等, 2016. 近百年来枝角类群落响应洱海营养水平、外来鱼类引入以及水生植被变化的特征. *湖泊科学*, 28(1): 132—140.
- 罗睿洁, 吴中海, 黄小龙, 等, 2015. 滇西北宾川地区主要活动断裂及其活动构造体系. *地质通报*, 34(1): 155—170.
- 孟艳芬, 郭宪国, 钱体军, 2008. 云南鸡足山小兽体表寄生虱状况调查. *中国病原生物学杂志*, 3(7): 531—533.
- 莫源富, 奚小双, 2010. 植被覆盖茂密区碳酸盐岩岩性的遥感识别——以灌江流域为例. *桂林理工大学学报*, 30(1): 41—46.
- 裴建国, 梁茂珍, 陈阵, 2008. 西南岩溶石山地区岩溶地下水系统划分及其主要特征值统计. *中国岩溶*, 27(1): 6—10.
- 彭贵, 焦文强, 1991. 洱海湖盆晚第四纪地层的¹⁴C年龄测定及洱海的演变. *地震地质*, 13(2): 179—183.
- 阮伏水, 周伏建, 1995. 花岗岩侵蚀坡地重建植被的几个关键问题. *水土保持学报*, 9(2): 19—25.
- 苏栋栋, 吴兆录, 高建云, 等, 2014. 云南大围山和鸡足山常绿阔叶林林下鸟类群落比较. *生态学杂志*, 33(1): 132—140.
- 苏锦兰, 李健, 杨桂荣, 等, 2015. 横断山系云岭余脉点苍山东侧小时降水特征对比分析. *气象*, 41(1): 17—24.
- 田清, 2016. 近60年来气候变化和人类活动对黄河、长江、珠江水沙通量影响的研究(博士学位论文). 上海: 华东师范大学.
- 万晔, 韩添丁, 段昌群, 等, 2005. 滇西名山点苍山地区地貌结构与特征研究. *冰川冻土*, 27(2): 241—248.
- 王二七, 樊春, 王刚, 等, 2006. 滇西哀牢山一点苍山形成的构造和地貌过程. *第四纪研究*, 26(2): 220—228.
- 王世杰, 2002. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. *中国岩溶*, 21(2): 101—105.
- 王显丽, 姜国强, 周雯, 等, 2016. 基于洱海水生态特征的流域

附中文参考文献

- 陈安东, 顾佳妮, 赵志中, 等, 2016. 云南大理点苍山末次冰期冰碛物石英砂扫描电镜形态特征分析. *冰川冻土*, 38(2): 453—462.
- 丁文荣, 2016. 环洱海地区气候变化特征研究. *长江流域资源与环境*, 25(4): 599—605.
- 冯志刚, 王世杰, 刘秀明, 等, 2009. 酸不溶物对碳酸盐岩风化壳发育程度的影响. *地质学报*, 83(6): 886—893.
- 官伟, 姜效典, 2017. 哀牢山—红河断裂带哀牢山—大象山段渐新世—早中新世热史演化及成因. *地球科学*, 42(2): 223—239.
- 顾佳妮, 陈安东, 赵志中, 等, 2016. 大理苍山世界地质公园第四纪冰碛物特征及年代测定. *地球学报*, 37(6): 769—778.
- 黄慧君, 王永平, 李庆红, 2013. 洱海流域近50年气候变化特征及其对洱海水资源的影响. *气象*, 39(4): 436—442.
- 康海亮, 林畅松, 刘晓, 等, 2016. 南堡凹陷北部东营组同沉积断裂对沉积体系及岩性圈闭的控制作用. *现代地质*, 30(2): 286—293.
- 况明生, 谢世友, 曾艳, 等, 2002. 云南大理点苍山地区晚更新世以来的古植被和古气候. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 27(5): 759—765.

- 最大日符合总量的控制.湖泊科学,28(2):271—280.
- 徐长贵,杜晓峰,徐伟,等,2017.沉积盆地源—汇系统研究新进展.石油与天然气地质,38(1):1—11.
- 许鲁君,刘辉志,曹杰,2014.大理苍山—洱海局地环流的数值模拟.大气科学,38(6):1198—1210.
- 杨春艳,杨广斌,陈智虎,2016.西南山区不同岩性背景下植被覆盖特征分析——以盘县为例.贵州师范大学学报(自然科学版),34(6):1—7.
- 杨立铮,1985.中国南方地下河分布特征.中国岩溶,4(1—2):92—100.
- 由明宇,覃荣高,曹广祝,等,2016.大理冲积扇含水层非均质性分布规律研究,52(4):734—742.
- 赵春强,赵利,曹淑云,等,2014.点苍山变质杂岩新生代变质—变形演化及其区域构造内涵.岩石学报,30(03):852—866.
- 赵海超,王圣瑞,焦立新,等,2013.洱海沉积物有机质及其组分空间分布特征.环境科学研究,26(3):243—249.
- 章慧,孙思敏,季汉成,等,2016.南堡凹陷边界断层分段特征及其对沉积体系的控制作用.油气地质与采收率,23(3):20—25.
- 张全,万晔,曾洪云,2016.点苍山大理冰期研究回顾、讨论与展望.云南地理环境研究,28(1):22—29.
- 张仕军,齐庆杰,王圣瑞,等,2011.洱海沉积物有机质、铁、锰对磷的赋存特征和释放的影响.环境科学研究,24(4):371—378.
- 周经才,1987.云南断陷湖盆现代沉积考察.新疆石油地质,8(1):60—63.
- 周江羽,吴冲龙,李星,等,2000.扇形沉积体生长过程的动力学机制及分形模拟.地球科学,25(1):33—38.
- 朱海虹,1991.云南断陷湖泊的形成和晚新生代的沉积及其演化.海洋与湖沼,22(6):509—516.
- 朱海虹,姚秉衡,1989.云南断陷湖泊三角洲沉积及其在石油勘探中的意义.石油与天然气地质,10(2):95—106.
- 朱红涛,杨香华,周心怀,等,2013.基于地震资料的陆相湖盆物源通道特征分析:以渤中凹陷西斜坡东营组为例.地球科学,38(1):121—129.
- 朱筱敏,钟大康,袁选俊,等,2016.中国含油气盆地沉积地质学进展.石油勘探与开发,43(5):820—829.