

东澳大利亚南悉尼盆地二叠系与地震沉积有关的软沉积变形构造

杜远生¹⁾, G. SHI^{1,2)}, 龚一鸣¹⁾, 徐亚军¹⁾

1) 中国地质大学(武汉)“生物地质与环境地质”教育部重点实验室; 430074

2) School of Ecology and Environment, Deakin University of Australia

内容提要:悉尼盆地位于澳大利亚东部, Lachlan 褶皱带和 New England 褶皱带之间。悉尼盆地从晚石炭世末到中三叠世经历了弧后扩张到前陆盆地的不同阶段: 弧后扩张阶段(石炭纪)、被动热沉降阶段(早、中二叠世 Berry 组)和挤压挠曲负载阶段(中二叠世 Broughton 组—三叠纪)。此时位于悉尼盆地东侧的 New England 褶皱带为岛弧背景。因此, 二叠纪处于弧后盆地的南悉尼盆地受弧后扩张和东侧弧前海沟俯冲的影响地震活动强烈, 发育一系列与地震有关的震积岩, 形成多种类型的与地震活动有关的软沉积物变形构造。南悉尼盆地二叠系的软沉积物变形包括地裂缝、震褶层、液化脉、沙火山、负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造、枕状层、滑塌构造、角砾岩化等。其中地裂缝、震褶层是地震颤动直接引起的断裂和褶皱; 枕状层是地震颤动引起的砂层脱水、下沉形成的; 液化脉、沙火山为液化的砂层穿入地震形成的裂隙形成的; 负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造是受地震颤动在砂、泥岩界面上由于砂层下沉、泥层上穿形成的; 滑塌构造和角砾岩化是地震引起的重力滑塌或泥石流形成的。地裂缝、震褶层、液化脉、沙火山、负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造、枕状层相当于原地震积岩, 而滑塌构造和角砾岩化属于异地震积岩。

关键词:震积岩; 软沉积变形; 二叠系; 悉尼盆地; 澳大利亚

1 地质背景

二叠纪时期, 澳大利亚可以分为 3 个大地构造和沉积单元(图 1a): 澳大利亚克拉通、新英格兰褶皱带(New England Fold Belt)和 Bowen-Gunnedah-悉尼盆地系(Brakel and Totterdell, 1996)。Bowen-Gunnedah-悉尼盆地系位于 Lachlan 褶皱带和新英格兰褶皱带之间, 自北向南为 Bowen 盆地、Gunnedah 盆地和悉尼盆地(图 1a)。该盆地系为一南北向的不对称海槽, 其西岸缓东岸陡, 沉积中心位于近新英格兰褶皱带一侧。其物源既有来自西侧克拉通方向的, 也有来自于东部岛弧褶皱带一侧的物源(Tye et al., 1996)。因此, 该盆地系被认为属于弧后盆地—前陆盆地的构造背景(Scheibur and Basden, 1996)。

悉尼盆地位于 Bowen-Gunnedah-悉尼盆地系的南部。其东北部以 Hunter-Mooki 冲断层与新英格兰岛弧褶皱带相隔, 西北部以 Monnt Coricudgy

背斜与 Gunnedah 盆地相邻(图 1b), 西部二叠系不整合覆盖于 Lachlan 加里东褶皱带之上(图 1c)。根据地震资料解释, 盆地东南部边界至少分布于东部大陆架边缘(图 1b)。

悉尼盆地南部的二叠纪地层发育, 在露头发育良好、沿海岸地区主要由下部 Tallaterang 群、中部 Shoalhaven 群和上部 Illawarra Coal Measures 组成(图 2)。

南悉尼盆地沿海岸 Tallaterang 群为 Wasp Head 组, 仅分布于悉尼盆地的南端, 与下伏的下奥陶统变质岩角度不整合接触。Wasp Head 组以砂岩、含砾砂岩为主, 其下部夹 3 层 2~4 m 的角砾岩, 厚度约 100 m, 时代为早二叠世。

南悉尼盆地沿海岸 Shoalhaven 群分为 6 个组级单位(Tye et al., 1996)(图 2)。其中 Pebbly Beach 组局限分布于悉尼盆地南端 Pebbly Beach 一带。其下部以砂岩、粉砂岩为主, 夹少量砾岩; 上部为粉砂岩、砂岩和粘土岩, 厚度约 155 m, 时代为早

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40672080)资助成果。

收稿日期: 2006-09-18; 改回日期: 2006-11-13; 责任编辑: 周健。

作者简介: 杜远生, 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师。主要从事沉积学和造山带地质学研究。通讯地址: 430074, 湖北省武汉市, 中国地质大学地球科学学院; 电话: 027-67883003; 传真: 027-67883002; Email: dxzyz@cug.edu.cn。

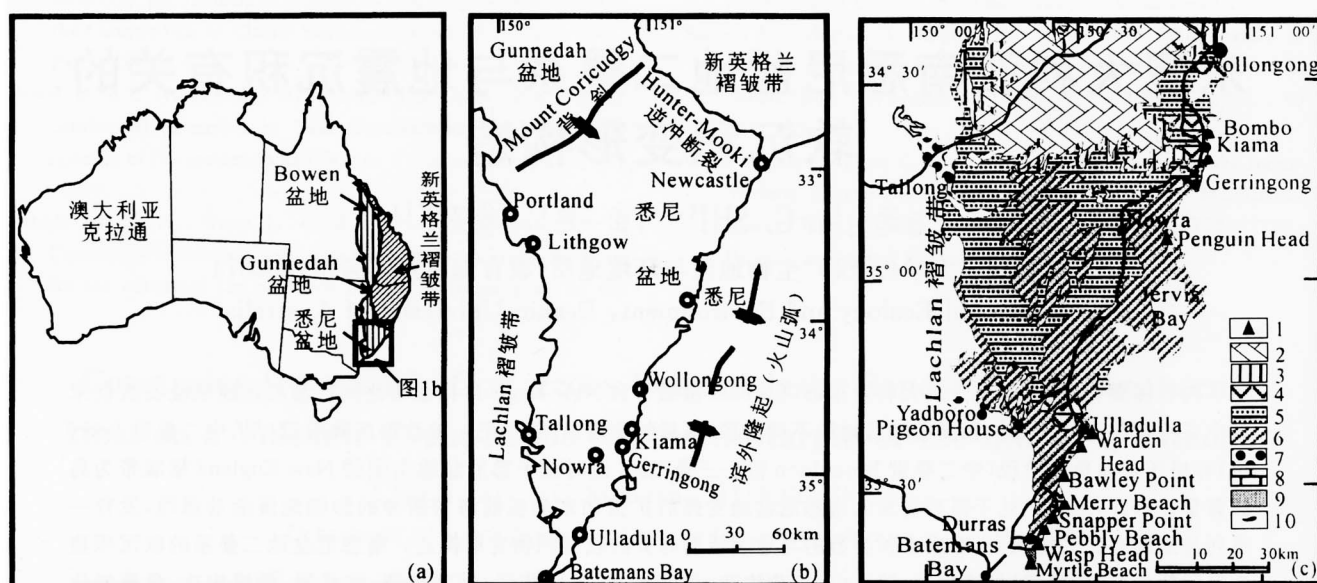


图 1 澳大利亚二叠纪的构造背景(a)、南悉尼盆地的构造格架图(b)和地质简图(c)

Fig. 1 Permian tectonic setting in Australia (a), tectonic outline (b) and simplified geological map (c) of southern Sydney Basin

- 1—观测剖面; 2—三叠系; 3—Illawarra Coal Measures; 4—火山岩; 5—Wandrawandian 粉砂岩 Broughton 组; 6—Snapper Point 组;
7—Yadboro and Tallong Conglomerates; 8—Pebbly Beach 组; 9—Wasp Head 组; 10—Clyde Coal Measures
- 1—Studied section; 2—Triassic; 3—Illawarra Coal Measures; 4—volcanic rocks; 5—Wandrawandian Siltstone—Broughton Formation;
6—Snapper Point Formation; 7—Yadboro and Tallong Conglomerates; 8—Pebbly Beach Formation;
9—Wasp Head Formation; 10—Clyde Coal Measures

二叠世。Snapper Point 组在悉尼盆地南部广泛分布。该组主要由砂岩及砾岩、粉砂岩夹层组成,厚度 170 m,时代为早二叠世。Wandrawandian 粉砂岩分布于 Ulladulla 一带,主要岩性为粉砂岩、泥质岩,内夹砂岩、含砾砂岩的夹层或透镜体,厚度 120 m 左右。Wandrawandian 粉砂岩含有大量腕足类、双壳类、苔藓类,以及指示冷水环境的矿物假晶 Glendonites,该地层原划分为下二叠统(Tye et al., 1996),相当于最新的二叠系三分地层表的中二叠统下部。Nowra 砂岩广泛分布于南悉尼盆地中、西部,底部为砾岩,向上以细到粗粒的砂岩、含砾砂岩为主,厚度约 90 m,时代为中二叠世中期。Berry 粉砂岩分布局限,以粉砂岩、泥质岩为主,厚度 230 m 左右,顶部见 3 m 厚的块状灰岩,时代为中二叠世中期。Broughton 组广泛分布于南悉尼盆地的中、西部,以长石砂岩或火山碎屑砂岩为主,内有多层火山岩和凝灰岩夹层,厚度 370 m,时代为中二叠世晚期(图 1c)。

Illawarra Coal Measures 为悉尼盆地晚二叠世的地层,分布于南悉尼盆地北部(图 1c),以含煤的碎屑岩沉积为主,厚度 340 m 左右。该地层下部以

砂岩为主偶夹煤层,上部砂、泥岩富含煤层,为澳大利亚的主要含煤层。其上为三叠系的陆相砂岩。

野外调查表明,南悉尼盆地二叠纪 Wasp Head 组、Pebbly Beach 组、Snapper Point 组、Wandrawandian 粉砂岩(Du et al., 2005)、Berry 组、Broughton 组震积岩均发育。与震积岩共生,发育各种不同类型的软沉积物变形构造。

2 软沉积变形构造

软沉积变形又称准同生变形,是指沉积物沉积之后、固结之前由于差异压实、液化、滑移、滑塌等形成的变形构造。这些变形往往伴随地壳颤动的触发因素,因此常和震积岩伴生。地震事件沉积源于 Heezen 和 Dyke(1964)对 1929 年加拿大 Grand Bank 大地震对海底沉积物位移、变形和引发的浊积岩的发现。1969 年,Seilacher 将地震作用改造未固结的水下沉积物形成的再沉积层定义为震积岩。1984 年,《Marine Geology》杂志出版了“地震与沉积作用”专集,对地震事件沉积作用进行了系统总结(Cita and Ricci Lucchi, 1984)。Shiki 等(2000)编辑出版了《Sedimentary Geology》震积岩、海啸岩、

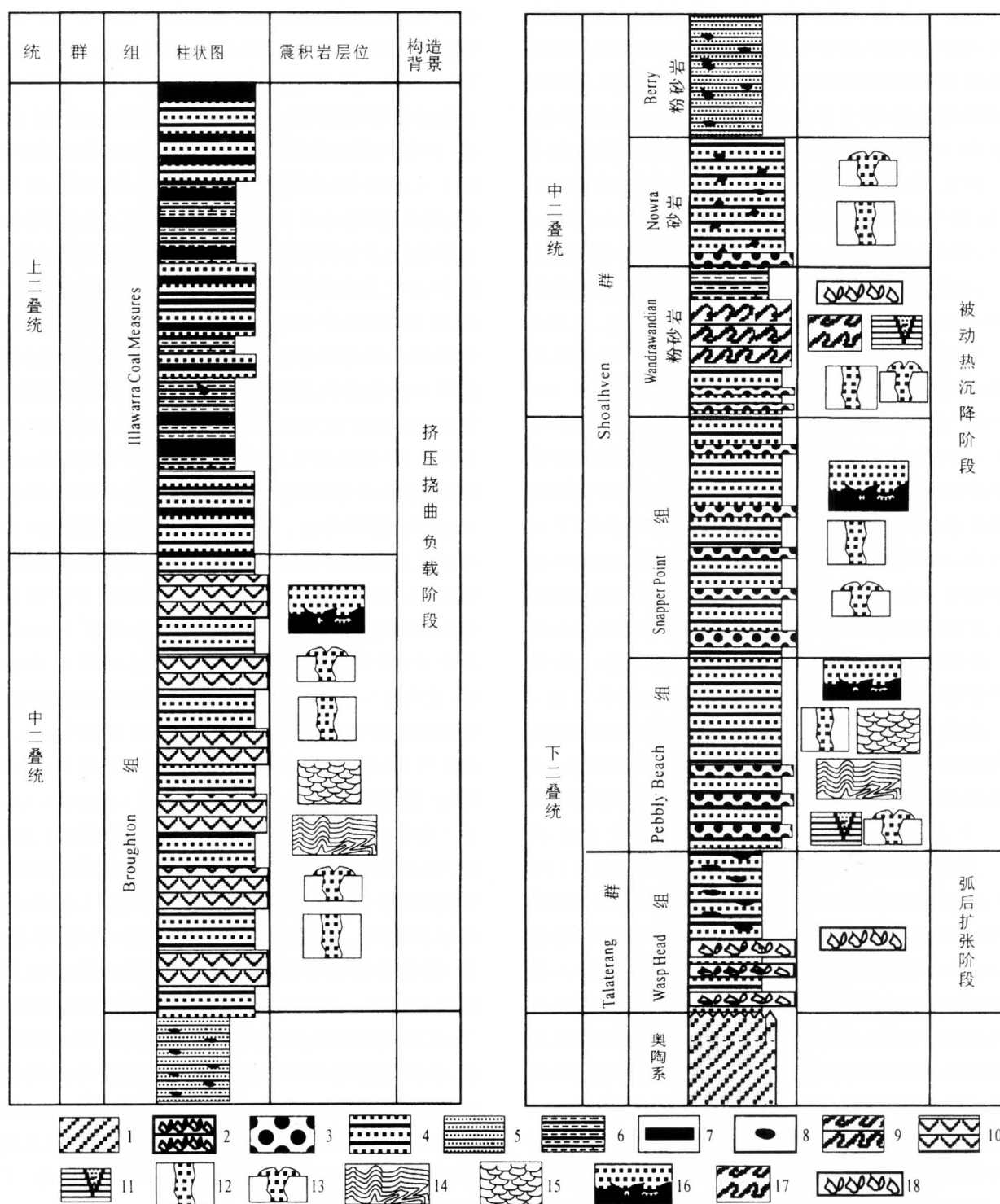


图 2 东澳大利亚南悉尼盆地二叠纪地层柱状图和地震引起的软沉积物变形构造

Fig. 2 Stratigraphic column and soft-sediment deformation structures related to earthquake from the Permian of the southern Sydney Basin, eastern Australia

1—奥陶系的变质岩;2—角砾岩;3—砂砾岩;4—砂岩;5—粉砂岩;6—泥质岩;7—煤层;8—冰积落石;9—滑塌构造;10—火山岩;

11—地裂缝;12—液化脉;13—沙火山;14—震褶层;15—枕状层;16—负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造;

17—滑塌沉积;18—泥石流沉积

1—Ordovician metamorphic rocks;2—breccia;3—sandy conglomerates;4—sandstones;5—siltstones;6—mudstones;7—coal bed;8—tillitic drop stone;9—slump structure;10—volcanic rocks;11—seismo-cracks;12—fluidized veins;13—sandy volcano;14—seismo-folds;15—pillow beds;16—load casts, flame structures, pillow structures, ball structures;17—slump deposits;18—debris deposits

震浊积岩的专辑。国内学者如宋天锐(1988)、乔秀夫等(1994,1996,1999)对华北中一新元古代及古生代地震及海啸沉积的研究,总结了地震事件沉积的不同岩相类型,恢复了地震节律及其区域构造背景。近年来,许多学者对与地震伴生的事件沉积进行了广泛研究,探讨了震积岩形成的构造背景及构造意义(彭阳等,2001;杜远生等,2001;Du et al.,2001,2005;段吉业等,2002;张琴等,2003;田洪水等,2003;杜远生,2005;殷秀兰和杨天南,2005;严兆彬等,2005;吕洪波等,2006;周志广等,2006)。

与国内大部分学者不同,国外学者非常重视对由地震引起的软沉积变形研究(Mohindra and Bagati,1996;Molina et al.,1998;Rossetti,1999)。Wheeler(2002)对地震和非地震成因的软沉积变形特征进行了区别。总体来说,软沉积物变形通常由于强烈的外力触发引起,这些外力除了地震以外,还可能包括火山活动、海啸、风暴、重力滑坡或滑塌等。但与典型震积岩共生的软沉积物变形应与地震作用有关。南悉尼盆地二叠系发育典型的震积岩序列(Du et al.,2005),与之伴生发育多种软沉积变形构造。

悉尼盆地二叠系与地震活动有关的软沉积物变形构造包括地震微断裂(地裂缝)、液化脉和沙火山、枕状层、负荷构造和变形层理、滑塌构造、角砾岩化等。

2.1 地震微断裂(地裂缝)

典型的地震微断裂(地裂缝)见于 Ulladulla 附近 Warden Head 的 Wandrawandian 粉砂岩下部和 Pebbly Beach 地区 Pebbly Beach 组(图版 I-1)。地裂缝剖面上呈楔状,层面上为带状。裂缝顶部宽度 30 cm,底部尖灭。裂缝深度 70 cm 左右。裂缝内充填含少量细砂的泥质岩脉。裂缝内的泥质岩脉岩性与围岩接近,但以内含生物屑更多、颜色略浅与围岩界限明显。

2.2 液化脉和沙火山

沉积物液化是南悉尼盆地二叠系最普遍的软沉积物变形构造。上覆泥质岩盖层的富含水的砂质沉积在上覆地层的压力下通常形成液化。这些液化的砂体在地震等强外力颤动作用下,常常沿地震形成裂隙挤入形成液化沉积岩脉(简称液化脉),若沿管状通道喷出沉积物表面,则形成沙火山。

南悉尼盆地二叠系由液化形成的液化脉和沙火山非常发育,但沙火山在国内外文献中没有报导。它们主要发育于 Pebbly Beach 组、Snapper Point

组、Wandrawandian 粉砂岩、Nowra 砂岩和 Broughton 组。南悉尼盆地二叠系的液化脉常见于 Wandrawandian 粉砂岩、Broughton 组中。液化脉岩性多数与围岩不一致,为浅色的砂岩(图版 I-2、4),少数与围岩接近,也与围岩一样为暗色砂岩(图版 I-3、5)。液化脉多数形态呈不规则状,如分叉状、绳状(图版 I-4)、飘带状(图版 I-3),呈现塑性变形特征。个别液化脉呈直带状,并沿断裂分布(图版 I-5)。液化脉宽度多数 10~20 cm,个别可达 25 cm 左右(图版 I-2)。液化脉内部均一状,或具上涌形成的不规则纹理。这些不规则的纹理反映这些脉体是在液化的状态下穿过上覆岩层涌动形成的。液化岩脉剖面上成不规则的墙状,穿入上覆岩层(图版 I-2)。不规则的液化岩脉为液化的沙冲破上覆岩层形成的,而直带状的液化脉是液化的沙沿断裂穿入上覆岩层形成的。南悉尼盆地二叠系的沙火山常与液化脉共生。沙火山岩性与暗色泥质岩、砂岩围岩不同,多为浅色砂岩。沙火山在层面上可以呈单个状(图版 I-6),也可以呈串珠状(图版 I-7)或群状分布(图版 I-8)。单个沙火山多成圆形或椭圆形,直径 8~25 cm,沙火山可见“火山口”(图版 I-8)或液化沙上涌形成的同心状纹理(图版 I-6)。剖面上可见火山颈的柱状液化砂体(图版 I-2)。

2.3 震褶层

南悉尼盆地二叠系的震褶层见于 Pepply Beach 组、Broughton 组等地层中,常见与震积岩成因的枕状层共生。震褶层厚度 10~30 cm 左右,褶曲长度 15~250 cm。震褶层多数呈不规则状(图版 I-2、II-1),褶曲形态不协调,定向性差,组成褶曲的岩层相互不连续。个别震褶层呈平卧状褶曲(图版 II-2),该震褶层与枕状层共生,褶曲呈不对称的平卧向斜,向斜两翼向中部卷曲。南悉尼盆地二叠系地层变形简单,多为缓倾斜的单斜层。震褶层一般限于局部的岩层中,震褶层上下岩层平整,因此认为震褶层为震积成因而非后期构造成因。

2.4 枕状层

枕状层是指地震振动引起的软沉积物变形形成的不规则枕状、球状层(Roep and Events,1992)。枕状层包括 3 种类型:完全变形的枕状层、非完全变形的枕状层和刚性变形的枕状层。南悉尼盆地二叠系的枕状层主要见于 Pepply Beach 组和 Broughton 组。枕状层底面呈下凹的枕状,剖面上为长椭圆状(图版 II-3、4)。单个枕状体宽度一般 10~20 cm,高度 10 cm 左右。枕状体层状分布,枕状层厚度 20

~150 cm 不等。枕状层通常形成大的负荷体,伴生枕状构造和火焰构造。侧向上,枕状层常与震褶层共生(图版 II-4)。该枕状层属于 Roep 和 Events (1992) 的非完全变形的枕状层。反映枕状体于液化的沙体在地震过程中,受地震颤动下沉而成。

2.5 负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造

负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造是南悉尼盆地二叠系最普遍发育的软沉积变形构造。几乎二叠系各组地层均有发育。这些构造是在地震过程中,受地震颤动的影响,上覆的砂层沉陷到下伏的泥层中形成的。砂层下沉在砂层底部形成负荷构造(图版 II-5、6),泥层挤入砂层形成火焰构造(图版 II-4)。当砂层呈枕状或球状坠入泥层,则形成枕状构造(图版 II-5)或球状构造。尤其特别的是,Snapper Point 组发育巨型的负荷构造(图版 II-6 左侧)和枕状构造(图版 II-6 右侧)。负荷构造高度 50 cm 左右,宽度 80~100 cm。枕状构造厚度 50 cm 左右,宽度 150 cm 左右。负荷体和枕状体均有内部变形特征。反映在负荷、坠入过程中,砂体伴生着震褶变形。

2.6 滑塌构造和角砾岩化

南悉尼盆地二叠系的滑塌变形主要见于 Ulladalla 附近的 Wandrawandian 粉砂岩中。Wandrawandian 粉砂岩分为 3 段:下段为非变形层,中段为滑塌变形层,上段为非变形层。其中下段非变形层发育典型的地裂缝(图版 I-1)、液化脉、沙火山(图版 I-6、7)等地震特有的软沉积变形构造,因此认为该滑塌层是由于地震引起的。该滑塌层岩层褶曲多为紧密同斜状、平卧状,褶曲轴面西倾,反映自西向东的滑动(Du et al., 2005)。滑塌层伴生一系列滑动面,并形成不规则的角砾岩化(图版 II-7)。角砾大小从几厘米到 2m 不等,杂乱排列,多为棱角状、次棱角状,没有分选性。反映在地震引起的滑塌过程中形成。在 Ulladalla 以南 Dolphin 海蚀崖上,液化脉和沙火山层之上还发育泥石流沉积,推测属于地震引发的泥石流。泥石流沉积为大小混杂、无分选、磨圆的杂砾岩,砾石最大可达 50~80 cm,小的仅为数毫米,砾石排列无定向性,局部可见泥岩形成的褶曲(图版 II-8)和泥石流之下的液化脉(图版 I-2、4)。

3 软沉积物变形构造组合及其成因解释

南悉尼盆地与地震有关的软沉积物变形在不同

的地层单元具有不同的组合方式。Wasp Head 组软沉积变形较不发育,仅见有局部的负荷构造。该组发育大量的丘状层理以及冰川成因的泥石流沉积。据古地理研究表明,东南澳大利亚二叠系处于高纬度地区,冰川发育并形成典型的冰海沉积(Brakel and Totterdell, 1996; Tye et al., 1996; Scheibur and Basden, 1996)。因此 Wasp Head 组的丘状层理应为海啸成因而非低纬度地区风暴成因的。据此分析认为,Wasp Head 组的负荷构造、丘状层理、泥石流沉积为地震—海啸—地震重力流沉积。

Pebbly Beach 组软沉积物变形发育且类型齐全。包括地裂缝、震褶层(图版 II-1、2)、负荷构造、火焰构造(图版 II-4)、枕状构造、球状构造、沙火山、枕状层等。上述软沉积变形构造通常在剖面上共生在一起,如 Pebbly Beach 海湾北侧的 Pebbly Beach 组具有典型的负荷构造、火焰构造、震褶层、枕状层共生在断面不到 10 m 的海蚀崖上。由于上述构造通常与地震作用有关,因此为震积作用成因无疑。

Snapper Point 组软沉积变形构造也非常发育,包括负荷构造、火焰构造、枕状构造、沙火山等。在 Merry 海湾南侧的海蚀平台上,发育各种类型的沙火山(图版 I-8),在海蚀崖上发育典型的负荷构造和火焰构造、枕状构造(图版 II-5),尤其在海蚀崖西段,发育大型具褶曲变形的负荷体(图版 II-6)。这些构造在地层剖面上自下而上的序列为沙火山—负荷构造、火焰构造、枕状构造—大型负荷构造。由于上述构造是与地震作用有关的常见软沉积变形,因此该序列代表地震形成的震积岩序列。

Wandrawandian 粉砂岩的震积岩已经报道(Du et al., 2005),本次研究发现了更丰富的与震积岩共生的软沉积变形。除了已经报道的地裂缝(图版 I-1)、滑塌构造与角砾岩化(图版 II-7、8)外,新发现的软沉积变形包括典型的沙火山(图版 I-6、7)和液化脉(图版 I-2、4、5)。Wandrawandian 粉砂岩的软沉积变形组合序列可见两种类型:一类是下部地裂缝、液化脉、沙火山组合,上部滑塌和角砾岩化组合,代表典型的震积岩—地震滑塌沉积序列。另一类是下部液化脉、沙火山、震褶层,上部为泥石流组合,代表震积岩—地震触发的泥石流沉积序列(图版 I-2)。

Nowra 砂岩发育于 Penguin Head,地层发育不全,软沉积变形主要见有液化脉(图版 I-3)、负荷构造、火焰构造等。根据上下地层震积岩发育分析,该地层的软沉积变形也和地震作用有关。

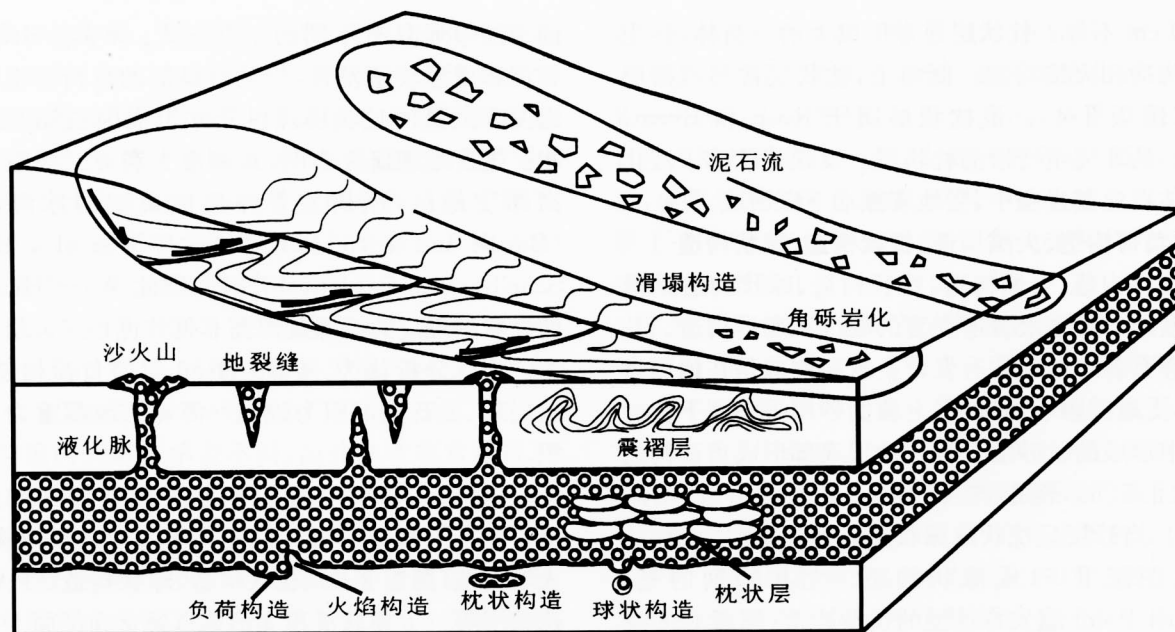


图3 南悉尼盆地二叠系与地震相关的软沉积变形模式

Fig. 3 The model of Permian soft-sediment deformation related to earthquake in Sydney Basin

Berry 粉砂岩出露局限,未发现软沉积变形构造。Broughton 组软沉积变形也非常发育,包括负荷构造、震褶层、枕状层。尤其是 Bombo Point 地区 Broughton 组的枕状层厚度可达 18 m 左右,枕状层呈长椭圆形或长枕形,枕状体边界清楚,泥质含量高。该组枕状层与火山岩间列,可能与火山引起的地震相关。

4 结论

东澳大利亚南悉尼盆地从晚石炭世末到中三叠世经历了弧后扩张到典型的前陆盆地的不同阶段:弧后扩张阶段(石炭纪)、被动热沉降阶段(早、中二叠世 Berry 组)和挤压挠曲卸载阶段(中二叠世 Broughton 组—三叠纪)(杜远生等,2003;Elliott, 1993)。此时位于悉尼盆地东侧的 New England 褶皱带为岛弧背景。因此,二叠纪处于弧后盆地的南悉尼盆地受弧后扩张和东侧弧前海沟俯冲的影响地震活动强烈,发育一系列与地震有关的震积岩沉积,形成多种类型的与地震活动有关的软沉积物变形构造。

南悉尼盆地二叠系的软沉积变形包括地裂缝、震褶层、液化脉、沙火山、负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造、枕状层、滑塌构造、泥石流、角砾岩化等。其中地裂缝、震褶层是地震颤动直接引起的断裂和褶皱;枕状层是地震颤动引起的砂层脱水、下沉形成的;液化脉、沙火山为液化的砂层穿入地震形

成的裂隙形成的;负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造是受地震颤动在砂、泥岩界面上由于砂层下沉、泥层上穿形成的;滑塌构造和角砾岩是地震引起的重力滑塌或泥石流形成的(图3)。地裂缝、震褶层、液化脉、沙火山、负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造、枕状层相当于原地震积岩,而滑塌构造和角砾岩属于异地震积岩(乔秀夫等,1994)。

参考文献

- 杜远生. 2005. 广西北海涠洲岛第四纪湖光岩组与火山活动有关的震积岩. 沉积学报, 23(2): 203~209.
- 杜远生, 张传恒, 韩欣, 顾松竹, 林文姣. 2001. 滇中元古代昆阳群地震事件沉积的新发现及其地质意义. 中国科学(D辑), (4): 283~289.
- 杜远生, Guang R Shi. 2003. 东澳大利亚悉尼盆地南部二叠纪的地层、沉积环境与盆地演化. 古地理学报, 5(2): 143~151.
- 段吉业, 刘鹏举, 万传彪. 2002. 华北燕山中—新元古代震积岩系列及其地震节律. 地质学报, 76(4): 441~445.
- 吕洪波, 章雨旭, 肖国望, 张绮玲. 2006. 内蒙古白云鄂博南东黑脑包腮林忽洞群下部发现地震滑塌岩块. 地质论评, 52(2): 163~169.
- 彭阳, 杨天南, 乔秀夫, 李典志, 王国桢, 杨中柱, 杨小波. 2001. 大连上震旦统地震灾变事件研究. 地质学报, 75(2): 221~227.
- 乔秀夫. 1996. 中国震积岩的研究与展望. 地质论评, 42(4): 316~320.
- 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 彭阳, 等. 1994. 碳酸盐岩振动液化地震序列. 地质学报, 68(1): 16~32.
- 乔秀夫, 高林志. 1999. 华北中—新元古代及早古生代地震灾变事件及与 Rodinia 的关系. 科学通报, 44(16): 1753~1758.
- 宋天锐. 1988. 北京十三陵前寒武纪碳酸盐岩地层中的一套可能的

- 地震—海啸序列. 科学通报, 33(8): 609~611.
- 田洪水, 万中杰, 王华林. 2003. 鲁中寒武系馒头组震积岩的发现及初步研究. 地质论评, 49(2): 121~131.
- 严兆彬, 郭福生, 彭花明, 杨志, 郭国林. 2005. 浙西寒武系大陈岭组地震事件沉积的初步研究. 地质学报, 79(6): 731~736.
- 殷秀兰, 杨天南. 2005. 胶州—莱阳盆地白垩纪莱阳群中的震积岩及其构造意义讨论. 地质论评, 51(5): 503~506.
- 张琴, 朱筱敏, 张建军, 宋刚, 闫伟鹏, 张伟群. 2003. 酒西盆地青南凹陷柳沟庄—窟窿山地区下白垩统震积岩的发现及意义. 地质学报, 77(2): 158~162.
- 周志广, 梁定益, 刘文灿, 万晓樵, 赵兴国, 王克方. 2006. 藏南晚白垩世宗卓组巨型混杂堆积的特征及其地裂—地震成因特征. 地质论评, 52(3): 314~320.
- Brakel A T, Totterdell J M. 1996. Palaeogeographic atlas of Australia. Vol. 6. Permian. Australian Geological Survey Organization, Canberra, 1~38.
- Cita M B, Ricci Lucchi F. 1984. Seismicity and sedimentation. Mar. Geol., 55(1-2): 1~161.
- Du Yuansheng. 2005. Seismites related to volcanic activity from Quaternary Huguangyan formation in Weizhou island, Beihai, Guangxi. Acta Sedimentologica Sinica, 23(2): 203~209 (in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Gong S Y, Han X, Wang J S, Gu S Z, Lin W J. 2001. Silurian seismites and its tectonic significance in Hanxia, Yumen city, north Qilian Mountains. Acta Geologica Sinica, 75: 385~390.
- Du Yuansheng, Shi Guangrong. 2003. Permian stratigraphy and sedimentary environments and basin evolution of Sydney Basin in eastern Australia. Journal of Palaeogeography, 5(2): 143~151 (in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Shi G R, Gong Y M. 2005. Earthquake-controlled event deposits and its tectonic significance from the Middle Permian Wandrawandian Siltstone in the Sydney Basin, Australia. China Science (Dser.), 48(9): 1337~1346.
- Duan Jiye, Liu Pengju, Wan Chuanbiao. 2002. Mesoproterozoic and Neoproterozoic seismites and its rhythm in the Yanshan area, North China Platform. Acta Geologica Sinica, 76(4): 441~445 (in Chinese with English abstract).
- Elliott L G. 1993. Post-Carboniferous tectonic evolution of eastern Australia. APEA Journal, 33: 215~236.
- Heezen B C, Dyke C L. 1964. Grand Bank Slump. American Association of Petroleum Geologists 48, 221~225.
- Lü Hongbo, Zhang Yuxu, Xiao Guowang, Zhang Qiling. 2006. Earthquake slump blocks discovered in lower part of the Sailinhuodong Group, Heinaobao, Southeast Bayan Obo, Inner Mongolia. Geological Review, 52(2): 163~169 (in Chinese with English abstract).
- Mohindra R, Bagati T N. 1996. Seismically induced soft-sediment deformation structures (seismites) around Sumdo in the lower Spiti valley (Tethys Himalaya). Sedimentary Geology, 101: 69~83.
- Molina J M, Alfaro P, Moretti M, Soria J M. 1998. Soft-sediment deformation structures induced by cyclic stress of storm waves in tempestites (Miocene, Guadalquivir Basin, Spain). Terra Nova, 10: 145~150.
- Peng Y, Yang T N, Qiao X F, Li D Z, Wang G Z, Yang Z Z, Yang X B. 2001. A study of seismic event in the Late Sinian carbonates of Dian. Acta Geologica Sinica, 75(2): 221~227 (in Chinese with English abstract).
- Qiao X, Song T, Gao L, Peng Y, Li H, Gao M, Song B, Zhang Q. 1994. Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction. Acta Geologica Sinica, 68: 16~34 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu. 1996. Study of seismites of China and its prospects. Geological Review, 42(4): 316~320 (in Chinese with English abstract).
- Qiao X, Gao L. 2000. Earthquake events in Neoproterozoic and Early Paleozoic and its relationship with super continental Rodinia in North China. Chinese Science Bulletin, 45(10): 931~935.
- Roep T B, Events A J. 1992. Pillow-beds; a new type of seismites? An example from an Oligocene turbidite fan complex, Alicante. Sedimentology, 39: 711~724.
- Rossetti D F. 1999. Soft-sediment deformation structures in late Albian to Cenomanian deposits, Sao Luis Basin, Northern Brazil; evidence for palaeoseismicity. Sedimentology, 46: 1065~1081.
- Scheibur E, Basden H. 1996. Geology of New South Wales—Synthesis, Vol. 1, Structural Framework. Geological Survey of New South Wales, Memoir Geology, 13(1): 60~65.
- Seilacher A. 1969. Fault-graded bed interpreted as seismites. Sedimentology, 13: 155~159.
- Shiki T, Cita M B, Gorsline D S. 2000. Seismoturbidites, seismites and tsunamites. Sedimentary Geology, 135: 1~326.
- Song Tianrui. 1988. A probable earthquake-tsunami sequence in Precambrian carbonate strata of Ming Tombs District, Beijing. Chinese Science Bulletin, 33(13): 1121~1124.
- Tian Hongshui, Wan Zhongjie, Wang Hualin. 2003. Discovery and preliminary study on seismites of the Cambrian Mantou Formation in the central Shandong Area. Geological Review, 49(2): 121~131 (in Chinese with English abstract).
- Tye S C, Fielding C R, Jones B G. 1996. Stratigraphy and sedimentology of the Permian Tataeraong and Shoalhaven Groups in the southernmost Sydney basin, New South Wales. Australian Journal of Earth Sciences, 43: 57~69.
- Wheeler R L. 2002. Distinguishing seismic from nonseismic soft-sediment structures; criteria from seismic-hazard analysis. In: Ertensohn F R, Rast N, Brett C E, ed. Ancient seismites. Geological Society of America Special Paper, 359: 1~11.
- Yan Z B, Guo F S, Peng H M, Yang Z, Guo G L. 2005. polot study on sedimentation of Cambrian Dachenling Formation resulting from seismic events in the west of Zhejiang Province. Acta Geologica Sinica, 79(6): 731~736 (in Chinese with English abstract).
- Yin Xiulan, Yang Tiannan. 2005. Seismites in the Laiyang Group in the Jiaozhou-Laiyang basin, Shandong Province, and their tectonic implications. Geological Review, 51(5): 503~506 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qin, Zhu Xiaomin, Zhang Jianjun, Song Gang, Yan Weipeng, Zhang Qunwei. 2003. The discovery of seismites and its significance in Lower Cretaceous in Liugouzhuang and Kulongshan region, Qingnan Sag, Jiuxi Basin. Acta Geologica Sinica, 77(2): 158~162 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhiguang, Liang Dingyi, Liu Wencan, Wan Xiaoqiao, Zhao Xingguo, Wang Keyou. 2006. Characters of slumping accumulation of Upper Cretaceous Zongzuo Formation and

demonstrate its caused by large break-up and earthquakes, southern Xizang (Tibet). Geological Review, 52(3): 314~320 (in Chinese with English abstract).

图 版 说 明

图 版 I

- 1. Ulladalla 地区 Wandrawandian 粉砂岩的地裂缝。
- 2. Dolphin 地区的 Wandrawandian 粉砂岩的液化脉。
- 3. Penguin Head 地区的 Nowra 砂岩的液化脉。
- 4. Dolphin 地区的 Wandrawandian 粉砂岩的液化脉。
- 5. Ulladalla 地区的 Wandrawandian 粉砂岩平行雁行断裂的液化脉。
- 6. Dolphin 地区的 Wandrawandian 粉砂岩的沙火山。
- 7. Dolphin 地区的 Wandrawandian 粉砂岩的沙火山。

- 8. Merry Beach 地区的 Snapper Point 组的沙火山。

图 版 II

- 1. Pepply Beach 的 Pepply Beach 组的震褶皱。
- 2. Pepply Beach 的 Pepply Beach 组的震褶皱。
- 3. Pepply Beach 地区的 Pepply beach 组的枕状层。
- 4. Pepply Beach 地区的 Pepply beach 组的火焰构造和枕状层。
- 5. Merry Beach 的 Snapper Point 组的负荷构造和枕状构造。
- 6. Merry Beach 的 Snapper Point 组的大型负荷构造和枕状构造(位于悬崖上,故无比例尺,变形层厚度 50 cm 左右)。
- 7. Ulladalla 地区的 Wandrawandian 粉砂岩的滑塌褶皱剪切面和角砾岩化。
- 8. Ulladalla 地区的 Wandrawandian 粉砂岩的泥石流沉积。

Permian Soft-Sediment Deformation Structures Related to Earthquake
in the Southern Sydney Basin, Eastern Australia

DU Yuansheng¹⁾, G. SHI^{1,2)}, GONG Yiming¹⁾, XU Yajun¹⁾

1) *Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Education Ministry, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei, 430074, China*

2) *School of Ecology and Environment, Deakin University, Melbourne Campus, 221 Burwood Highway, Burwood, Victoria 3125, Australia*

Abstract

The southern Sydney Basin is located in the southernmost part of the north-south trending Bowen-Gunnedah-Sydney Basin system, bordering the New England Fold Belt in the northeast and the Lachlan Fold Belt to the west. As such, the study area is generally considered to be part of a large foreland basin system within the Tasman Fold Belt of eastern Australia. Various studies have indicated that the southern Sydney Basin evolved from a back-arc extensional phase in the latest Carboniferous, through a passive thermal sag phase from the Early Permian to Middle Permian, to a typical foreland basin setting from the Late Permian to Middle Triassic characterized by tectonic stacking (from the east and northeast), flexural loading and increased compression. Tn back-arc Sydney Basin was intensely affected by back-arc spreading and trench subduction of the New England island arc, and developed serious earthquake and earthquake-related soft-sediment deformation. The soft-sediment deformation of Permian in the southern Sydney Basin consist of seismo-cracks, seismo-folds, fluidized veins, sandy volcano, load casts, flame structures, pillow structures, ball structures, pillow beds, slump structures and brecciation. The seismo-cracks and seismo-folds are cracks and folds formed directly by oscillation of earthquake. The pillow beds formed by dehydration and sinking of the sandy beds during earthquake’s oscillation. Fluidized veins and sandy volcano were made by instill into the seismo-fissures of the fluidized sands. The load casts, flame structures, pillow structures and ball structures were formed by sinking and instilling caused from oscillation of earthquake along the face between sandy and muddy beds. The slump structures and brecciation formed by gravity flow related to earthquake. The eismo-fissures, seismo-folds, fluidized veins, sandy volcano, load casts, flame structures, pillow structures, ball structures and pillow beds belong to the autochthonous seismites and slump structures and brecciation to allochthonous seismites.

Key words: seismites; soft-sedimentary deformation; Permian; Sydney Basin; Australia

