朝鲜平南盆地祥原超群的沉积时代与拉伸纪早期碳同位素负漂移*

朴贤旭[1] 翟明国[2] 杨正赫[1] 彭澎[2**] 金正男[1] 张艳斌[2] 金明哲[1] 朴雄[1] 冯连君[2]

PARK HyonUk[1], ZHAI MingGuo[2], YANG JongHyok[1], PENG Peng[2**], KIM JongNam[1], ZHANG YanBin[2], KIM MyongChol[1], PARK Ung[1] and FENG LianJun[2]

1. 朝鲜国家科学院地质学研究所,平壤 3812100
2. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029
1. *Institute of Geology, State Academy of Sciences, Pyongyang* 3812100, *DPRK*
2. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*

2015-08-17 收稿, 2016-01-03 改回.

Park HU, Zhai MG, Yang JH, Peng P, Kim JN, Zhang YB, Kim MC, Park U and Feng LJ. 2016. Deposition age of the Sangwon Supergroup in the Pyongnam basin (Korea) and the Early Tonian negative carbon isotope interval. ***Acta Petrologica Sinica*****, 32(7):2181 – 2195**

Abstract The relationship of the Pyongnam basin with other basins in the Eastern North China Craton (Sino-Korean Craton) is in debating; and the deposition age is one key to solve this. The strata in the Pyongnam basin are mainly composed of the Sangwon Supergroup, which comprises the Jikhyon Group, the Sadangu Group, the Muckchon Group, the Myoransan Group and the Yontan Group from bottom to up. The Jikhyon Group is the lowermost formation and comprises of mainly terrestrial clastic sediments. Detrital zircons were separated from the clastic rocks of the Jikhyon Group of both the 'north-type' and 'south-type' strata of the Pyongnam basin, and their LA-ICP-MS U-Pb ages constrain the maximum deposition age to be 1100Ma. It further suggests that there are no differences either in deposition age or provenance between the so-called 'north-type' and 'south-type' strata. As the mafic sills in the Muckchon Group were intruded at ~900Ma, we suggest that the majority of the Sangwon Supergroup was deposited at 1000 ~ 900Ma, with the Yontan Group to be slightly younger. This indicates that the Pyongnam basin is contemporary with those in the Xu-Huai and Lv-Da basins. The variation of $\delta^{13}C$ values of the carbonate samples from the Sangwon Supergroup shows a distinct negative drifting ($\delta^{13}C$ value as low as −6‰ ~ −5‰) in the Mukchon Group. As the mafic sills in the Mukchon Group were emplaced at ~900Ma, we suggest that this negative drifting of $\delta^{13}C$ values happened slightly older than ~900Ma, and is possibly related to a coeval magmatic event.

Key words Korea; Pyongnam basin; Sangwon Supergroup; Detrital zircon age; Carbon isotope; Deposition age

摘 要 朝鲜平南盆地与东华北克拉通(中朝克拉通)中新元古代盆地的对比存在争议,准确厘定相关沉积建造的沉积时限是解决这些争议的关键。朝鲜平南盆地的地层主体为祥原超群,从下往上依次为直岘群、祠堂隅群、默川群、灭恶山群和燕滩群。直岘群是祥原超群的最下部层位,大部分由陆源碎屑岩组成。从平南盆地"北部型"和"南部型"直岘群碎屑岩中分选锆石,测得 LA-ICP-MS U-Pb 年龄,限定祥原超群沉积时代晚于 1100Ma,并且得出所谓的"北部型"和"南部型"地层没有时代和物源差异。鉴于默川群的基性岩床时代为 ~900Ma,祥原超群的沉积时代为新元古代早期(1000 ~ 900Ma),燕滩群的时代可能稍晚。这说明平南盆地与华北徐淮盆地和旅大盆地等同时。祥原超群碳酸盐岩样品的 $\delta^{13}C$ 值数据表明,默川群时期碳同位素发生了负漂移($\delta^{13}C$ 值为 −6‰ ~ −5‰)。鉴于侵入到默川群的基性岩床的时代为 ~900Ma,我们认为该碳同位素($\delta^{13}C$ 值)负漂移略早于 ~900Ma,可能与同一时期的岩浆活动有关。

关键词 朝鲜;平南盆地;祥原超群;碎屑锆石年龄;碳同位素;沉积时代

中图法分类号 P534.3;P597.3

---

* 本文受国家自然科学基金项目(41210003)资助.

第一作者简介:朴贤旭,男,1958 年生,研究员,沉积地质学专业

** **通讯作者**:彭澎,男,1978 年生,研究员,前寒武纪地质学专业,E-mail: pengpengwj@mail.iggcas.ac.cn

1 引言

朝鲜平南盆地(或称平南坳陷)位于朝鲜半岛的中部,是朝鲜主要构造单元之一,盆地北与狼林地块,南与临津江构造带相邻。平南盆地占朝鲜半岛总面积的将近1/10,是朝鲜半岛中、新元古界和古生界盖层发育且最广阔、最完整的沉积盆地(Paek and Jon, 1996)。祥原超群发育于甑山群、义州群和黄海群变质岩系之上,是平南盆地最为重要的碳酸盐岩-碎屑岩沉积建造,对其沉积时代一直未有定论(Paek and Jon, 1996)。近年来,研究者根据微化石生物地层学把祥原超群最上部层位燕滩群棱里组的年代确定为新元古代晚期(Jang and Pak, 2000; Jang and Pae, 2004; Jang, 2001; Ri and Park, 2005; Park and So, 2002, 2010)。但大部分学者还是认为祥原超群主体形成于中元古代(Park *et al.*, 2002, 2006)。Peng *et al.* (2011a)报道了朝鲜中部沙里院附近侵入到默川群的基性岩床~899Ma的斜锆石年龄,限定祥原超群第三个群——默川群的沉积时代不小于899Ma,从而提出祥原超群可能形成于新元古代早期。不过,祥原超群第五个群——燕滩群里找不到类似基性岩床(Paek and Jon, 1996),说明部分地层可能年轻于岩床的侵位,或者基本同时。Hu *et al.* (2012)根据朝鲜平南盆地中部沙里院附近的祥原超群直岘群变砂岩碎屑锆石U-Pb年龄测试结果提出祥原超群沉积不早于~1000Ma。不过,祥原超群分布广,岩性多样,还存在南北差异,需要进一步工作来确定盆地内地层单元的关系和沉积时代。

祥原超群岩石组成中碎屑岩大约占一半,其他一半是碳酸盐岩,尤其是祠堂隅群与灭恶山群几乎全部是碳酸盐岩,此外直岘群中部层位五峰组和默川群中部组玉岘组也有碳酸盐岩(Paek and Jon, 1996)。地质时代海水碳同位素组成演化主要反映了全球海相碳酸盐岩对有机碳的沉积埋藏速率的变化(Broecker, 1970; Hayes *et al.*, 1983),高的碳酸盐岩的$\delta^{13}C$值代表相对高的有机碳埋藏速率。沉积的碳酸盐岩的$\delta^{13}C$值基本代表海水的碳同位素组成。虽然新元古代不同盆地中碳酸盐岩$\delta^{13}C$存在一定的地区性变化,幅度在1‰~2‰,但$\delta^{13}C$变化的总的趋势和幅度基本一致,因而即使海水中碳同位素组分存在地理性差异,但其时空变化,尤其是幅度变化,可能反映了当时全球性海水的变化(Kaufman *et al.*, 1996)。相对中元古代的"平静"时期,新元古代沉积的海相碳酸盐岩具有地质历史上最大幅度的碳同位素负漂移和摆动(Kaufman and Knoll, 1995; Hoffman *et al.*, 1998; Hill *et al.*, 2000; 华洪和曹瑞骥, 2003; 刘燕学等, 2005; Chu *et al.*, 2007; Halverson *et al.*, 2007a, b, 2010; 张雷雷等, 2010)。

本文拟通过对祥原超群碳酸盐岩碳同位素研究探讨祥原超群沉积的碳酸盐岩的碳同位素负漂移和可能的时代烙印,包括与祥原超群中的碎屑锆石U-Pb定年的对照和与全球同时期地层的对比。

2 地质概况

朝鲜平南盆地的地层主体为祥原超群,从下往上依次为直岘群、祠堂隅群、默川群、灭恶山群和燕滩群。传统上,大部分研究者根据在中和-安边一线以北的祥原超群比以南的相似地层厚度薄而且相对简单而将其分成"北部型"和"南部型",认为"南部型"略早于"北部型"(Paek *et al.*, 1987; Riu *et al.*, 1990)。平城北部属于"北部型",其中的直岘群从下往上为遂安组、新城组、物金山组、桧仓组(分别对应"南部型"直岘群的长峰组、五峰组、长寿山组、安心岭组)。整合于其上的祠堂隅群由内洞组、五峰山组、半天组组成(分别对应"南部型"祠堂隅群的云积山组、德在山组、青石头组)。其上默川群由新河组、马田组和燕山组组成(分别对应"南部型"默川群的雪花山组、玉岘组和临山组)(Park, 2012)(图1)。现在多认为两者形成时期相同(Ri *et al.*, 1988; Paek and Jon, 1996; Park, 2006; Han and Park, 2011)。

平城地区"北部型"直岘群在岩石组合上与平南盆地南部的直岘群差不多,但地层厚度不到南部的一半,底部为砂岩,粉砂岩,泥岩等陆源碎屑岩,中部泥质-碳酸质页岩,上部砂岩,砂质页岩,最上部碳酸质页岩组成。这与"南部型"直岘群基本一致,只是"南部型"直岘群最底部还可见底砾岩。总体上"北部型"与"南部型"的祠堂隅群都是碳酸盐岩为主:北部下段为石灰岩,中-上段为白云岩,南部中段为白云岩,上段为石灰岩。默川群在岩石组合上北部与南部没有差别,但厚度上,南部稍厚。灭恶山群和燕滩群地层南北部基本相似。

3 样品描述

碎屑锆石样品与碳同位素样品采自平南盆地北部平城市以北(样品12-Ck4)和平南盆地南部凤山郡(样品12-Ob3、12-Zn4和12-Zn5)(图1)。

样品12-Ck4为浅变质细粒长石石英砂岩,采自"北部型"直岘群物金山组,为薄层状灰白色细粒长石石英砂岩,地层真厚度50m左右。样品12-OB3为浅变质泥质砂岩样品,采自"南部型"直岘群五峰组,五峰组厚100m。样品12-Zn4和12-Zn5为灰白色长石石英砂岩,采自"南部型"直岘群长寿山组,长寿山组厚300m。

碳酸盐岩样品采自平城以及南部凤山郡与银波郡(图1)。平城地区碳酸盐岩样品(16件)离样品12-Ck4约1.5km,主要来自"北部型"直岘群最上部桧仓组、祠堂隅群的内洞组、五峰山组和半天组和默川群马田组。本区桧仓组岩性主要由石英绢云母片岩,石灰质绿泥石片岩,中厚层状变砂岩组成,中间夹有灰白色石灰岩;内洞组由灰色-暗灰色层状泥质石灰岩,灰色细晶质石灰岩,石灰质片岩组成;五峰

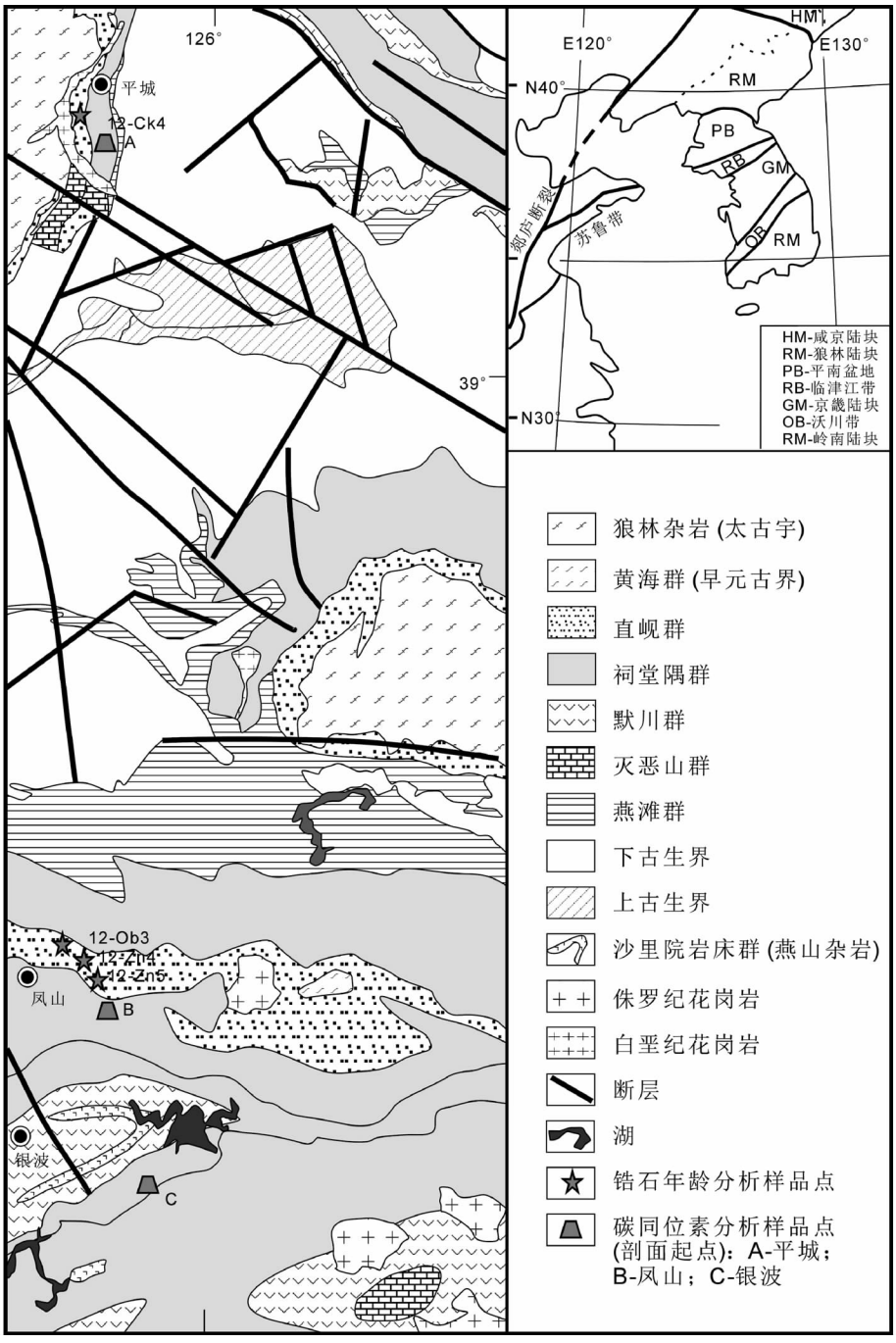

图 1 朝鲜祥原超群地质简图与采样位置图(据 Paek and Jon, 1996;金炳成, 2012 修改)

Fig. 1 Simplified geological map showing the sampling localities of the Sangwon Supergroup in Korea (after Paek and Jon, 1996; Jin, 2012)

山组由淡灰色层状白云岩,暗灰色层状白云岩,灰色-暗灰色块状白云岩组成;半天组由暗灰色灰岩夹白云岩组成;马田组由肉红色细晶质石灰岩,灰白色细晶质石灰岩,石英绢云母片岩组成。

凤山郡碳酸盐样品(13 件)靠近样品 12-OB3,样品采自"南部型"直岘群安心岭组与祠堂隅群。本区安心岭组由暗灰色薄层状石灰岩、暗灰色粘土质石灰岩组成,祠堂隅群云积山组由灰色层状石灰岩,泥质石灰岩组成,与下部安心岭组和上部德在山组都以断层接触。德在山组由厚层状白云岩,块状白云岩,不一致石灰岩组成。岩石结晶程度很低,无穿插细脉。

银波郡碳酸盐样品(87 件)来自"南部型"直岘群五峰组、祠堂隅群云积山组、德在山组、青石头组与默川群玉岘组。直岘群五峰组由薄层状-中后层状灰白色石灰岩组成,

表 1 祥原超群直岘群碎屑锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 U-Pb isotope analyses of detrital zircons from the Jikhyon Group of the Sangwon Supergroup

测点号	同位素比值						年龄(Ma)					
	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ
12-CK4(浅变质细粒长石石英砂岩,直岘群物金山组)												
01	0.11438	0.0012	5.25155	0.05177	0.33310	0.00408	1870	10	1861	8	1853	20
02	0.07645	0.0013	2.05885	0.03222	0.19537	0.00269	1107	14	1135	11	1150	15
03	0.09776	0.00082	3.79895	0.03063	0.28191	0.00319	1582	10	1593	6	1601	16
04	0.09670	0.00113	2.97468	0.03222	0.22316	0.00275	1561	10	1401	8	1299	14
05	0.10887	0.00135	4.44111	0.05121	0.29593	0.00382	1781	11	1720	10	1671	19
06	0.10515	0.00125	4.56422	0.05071	0.31488	0.00399	1717	10	1743	9	1765	20
07	0.09048	0.00085	3.27818	0.02906	0.26280	0.00302	1436	10	1476	7	1504	15
08	0.13820	0.00086	4.90730	0.02994	0.25755	0.00277	2205	10	1804	5	1477	14
09	0.10745	0.00082	4.62295	0.03398	0.31207	0.00347	1757	10	1753	6	1751	17
10	0.09790	0.00091	3.81046	0.03343	0.28229	0.00326	1585	10	1595	7	1603	16
11	0.09534	0.00129	3.47636	0.04373	0.26447	0.00345	1535	11	1522	10	1513	18
12	0.09875	0.00108	3.83613	0.03940	0.28174	0.00342	1601	10	1600	8	1600	17
13	0.07957	0.00127	2.23902	0.03299	0.20407	0.00275	1186	13	1193	10	1197	15
14	0.07638	0.00123	2.036400	0.03022	0.19335	0.00259	1105	13	1128	10	1139	14
15	0.14985	0.00110	2.76225	0.01875	0.13368	0.00147	2344	10	1345	5	809	8
16	0.12273	0.00098	6.26800	0.04843	0.37037	0.00419	1996	10	2014	7	2031	20
17	0.11181	0.00078	4.49241	0.03052	0.29138	0.00317	1829	10	1730	6	1648	16
18	0.07886	0.00177	2.01605	0.04139	0.18540	0.00296	1169	19	1121	14	1096	16
19	0.10299	0.00111	3.12442	0.03123	0.21998	0.00263	1679	10	1439	8	1282	14
20	0.09261	0.00192	3.39304	0.06465	0.26569	0.00429	1480	16	1503	15	1519	22
21	0.09457	0.00089	3.62033	0.03230	0.27760	0.00318	1520	10	1554	7	1579	16
22	0.10826	0.00090	3.20143	0.02512	0.21444	0.00239	1770	10	1458	6	1252	13
23	0.08029	0.00073	2.26479	0.01951	0.20454	0.00228	1204	10	1201	6	1200	12
24	0.07754	0.00082	2.10336	0.02075	0.19669	0.00226	1135	10	1150	7	1158	12
25	0.09585	0.00188	3.34462	0.04771	0.25309	0.00341	1545	38	1492	11	1454	18
26	0.10327	0.00107	3.60217	0.03478	0.25293	0.00298	1684	10	1550	8	1454	15
27	0.09288	0.00108	3.37105	0.03668	0.26316	0.00319	1485	10	1498	9	1506	16
28	0.07937	0.00084	2.21685	0.02185	0.20253	0.00233	1181	10	1186	7	1189	12
29	0.09339	0.00091	2.90921	0.02657	0.22587	0.00258	1496	10	1384	7	1313	14
30	0.08061	0.00081	2.35003	0.02222	0.21140	0.00241	1212	10	1228	7	1236	13
31	0.08009	0.00076	2.14923	0.01906	0.19458	0.00217	1199	10	1165	6	1146	12
32	0.0911	0.00077	3.00146	0.02409	0.23889	0.00263	1449	10	1408	6	1381	14
33	0.09973	0.00095	3.10866	0.02749	0.22601	0.00257	1619	10	1435	7	1314	14
34	0.07969	0.00156	2.21044	0.03966	0.20112	0.00295	1189	16	1184	13	1181	16
35	0.07923	0.00087	2.05083	0.02099	0.18768	0.00217	1178	10	1133	7	1109	12
36	0.09964	0.00114	3.94625	0.04219	0.28719	0.00348	1617	10	1623	9	1627	17
37	0.08337	0.00165	2.17385	0.03214	0.18912	0.00248	1278	39	1173	10	1117	13
38	0.09398	0.00117	3.31683	0.03844	0.25591	0.00316	1508	10	1485	9	1469	16
39	0.09707	0.00119	3.34546	0.03807	0.24990	0.00308	1569	10	1492	9	1438	16
40	0.08018	0.00088	2.23628	0.02296	0.20223	0.00233	1201	10	1192	7	1187	12
41	0.10519	0.00140	4.10811	0.03232	0.28324	0.00305	1718	25	1656	6	1608	15
42	0.08337	0.00066	2.33496	0.01757	0.20309	0.00218	1278	10	1223	5	1192	12
43	0.07820	0.00228	2.07942	0.05528	0.19283	0.00363	1152	26	1142	18	1137	20
44	0.09439	0.00156	1.54105	0.02278	0.11839	0.00160	1516	12	947	9	721	9
45	0.09749	0.00097	3.40874	0.03154	0.25356	0.00289	1577	10	1506	7	1457	15
46	0.09085	0.00099	2.92923	0.02980	0.23382	0.00273	1443	10	1389	8	1354	14
47	0.16320	0.00114	6.86758	0.04561	0.30516	0.00328	2489	10	2094	6	1717	16
48	0.082	0.00135	1.81379	0.02714	0.16041	0.00213	1246	13	1050	10	959	12

续表 1

Continued Table 1

测点号	同位素比值						年龄(Ma)					
	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ
12-Zn4(灰白色长石石英砂岩,直岘群长寿山组)												
01	0.10011	0.00156	4.04406	0.05814	0.29330	0.00404	1626	12	1643	12	1658	20
02	0.09878	0.00226	3.97173	0.08359	0.29193	0.00510	1601	18	1628	17	1651	25
03	0.07639	0.00173	2.17497	0.04525	0.20672	0.00328	1105	19	1173	14	1211	18
04	0.09769	0.00167	3.96747	0.06275	0.29487	0.00426	1580	13	1628	13	1666	21
05	0.10649	0.00083	4.83553	0.03568	0.32964	0.00353	1740	10	1791	6	1837	17
06	0.10087	0.00164	4.31465	0.06497	0.31054	0.00440	1640	13	1696	12	1743	22
07	0.11614	0.00271	5.65296	0.12215	0.35332	0.00665	1898	17	1924	19	1950	32
08	0.09798	0.00140	4.20940	0.05587	0.31185	0.00410	1586	11	1676	11	1750	20
09	0.09993	0.00103	4.34340	0.04193	0.31550	0.00363	1623	10	1702	8	1768	18
10	0.09728	0.00184	4.31143	0.07558	0.32170	0.00496	1573	15	1696	14	1798	24
11	0.11473	0.00195	5.57312	0.08787	0.35256	0.00531	1876	13	1912	14	1947	25
12	0.10231	0.00192	4.42648	0.07679	0.31401	0.00486	1666	14	1717	14	1760	24
13	0.09105	0.00221	3.09714	0.05806	0.24671	0.00379	1448	47	1432	14	1421	20
14	0.07821	0.00105	2.30406	0.02861	0.21379	0.00259	1152	11	1214	9	1249	14
15	0.08695	0.00152	2.90051	0.04664	0.24208	0.00340	1359	14	1382	12	1398	18
16	0.09736	0.00147	3.85416	0.05377	0.28729	0.00385	1574	12	1604	11	1628	19
17	0.10205	0.00139	4.42836	0.05613	0.31488	0.00407	1662	11	1718	10	1765	20
18	0.09651	0.00120	3.89097	0.04498	0.29254	0.00358	1558	10	1612	9	1654	18
19	0.09678	0.00198	3.98996	0.07535	0.29914	0.00481	1563	16	1632	15	1687	24
20	0.10184	0.00234	4.12931	0.08737	0.29419	0.00518	1658	18	1660	17	1662	26
21	0.09508	0.00147	3.90293	0.05600	0.29782	0.00403	1530	12	1614	12	1680	20
22	0.08250	0.00251	2.45435	0.06832	0.21584	0.00430	1257	26	1259	20	1260	23
23	0.09918	0.00242	4.33118	0.09763	0.31685	0.00582	1609	19	1699	19	1774	28
24	0.11412	0.00369	5.26878	0.15679	0.33495	0.00808	1866	24	1864	25	1862	39
25	0.11663	0.00291	5.54162	0.12784	0.34468	0.00676	1905	19	1907	20	1909	32
26	0.10750	0.00124	5.04431	0.05442	0.34038	0.00412	1757	10	1827	9	1888	20
27	0.07883	0.00080	2.21896	0.02099	0.20420	0.00225	1168	10	1187	7	1198	12
28	0.11553	0.00411	5.43778	0.17827	0.34142	0.00900	1888	27	1891	28	1893	43
29	0.11484	0.00097	5.62592	0.04494	0.35537	0.00388	1877	9	1920	7	1960	18
30	0.10782	0.00142	4.77647	0.05837	0.32135	0.00410	1763	10	1781	10	1796	20
31	0.09858	0.00188	3.81961	0.06712	0.28103	0.00430	1597	15	1597	14	1597	22
32	0.15780	0.00189	10.51949	0.12032	0.48351	0.00642	2432	10	2482	11	2543	28
33	0.08121	0.00067	2.31222	0.01775	0.20652	0.00216	1227	10	1216	5	1210	12
34	0.09419	0.00217	3.84681	0.08177	0.29620	0.00510	1512	18	1603	17	1672	25
35	0.09911	0.00117	3.82311	0.04184	0.27976	0.00334	1607	10	1598	9	1590	17
36	0.10189	0.00259	4.00649	0.09331	0.28518	0.00535	1659	20	1636	19	1617	27
37	0.09721	0.00154	1.94094	0.02126	0.14482	0.00166	1571	30	1095	7	872	9
38	0.07954	0.00128	2.32390	0.03432	0.21186	0.00276	1186	13	1220	10	1239	15
39	0.10432	0.00142	4.46637	0.05651	0.31048	0.00399	1702	11	1725	10	1743	20
40	0.10166	0.00192	4.49034	0.07860	0.32029	0.00494	1655	14	1729	15	1791	24
41	0.08304	0.00109	2.42120	0.01962	0.21146	0.00218	1270	26	1249	6	1237	12
42	0.09882	0.00121	4.01111	0.04564	0.29433	0.00356	1602	10	1636	9	1663	18
12-Zn5(灰白色长石石英砂岩,直岘群长寿山组)												
01	0.08424	0.00194	2.62355	0.05530	0.22589	0.00371	1298	19	1307	15	1313	20
02	0.22082	0.00289	17.84895	0.22798	0.58630	0.00888	2987	11	2982	12	2974	36
03	0.08032	0.00175	2.26685	0.04530	0.20472	0.00320	1205	18	1202	14	1201	17
04	0.09451	0.00133	3.64166	0.04745	0.27950	0.00361	1518	11	1559	10	1589	18
05	0.10853	0.00188	4.73550	0.07587	0.31648	0.00473	1775	13	1774	13	1773	23
06	0.10103	0.00428	4.05142	0.15725	0.29086	0.00839	1643	34	1645	32	1646	42
07	0.09735	0.00139	3.70853	0.04878	0.27630	0.00361	1574	11	1573	11	1573	18

续表 1

Continued Table 1

测点号	同位素比值						年龄(Ma)					
	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ
08	0.09996	0.00133	3.94688	0.04849	0.28640	0.00364	1623	11	1623	10	1624	18
09	0.09228	0.00223	3.50289	0.07793	0.27534	0.00488	1473	19	1528	18	1568	25
10	0.07976	0.00095	2.33956	0.02580	0.21276	0.00249	1191	10	1224	8	1244	13
11	0.08931	0.00236	3.01103	0.07297	0.24453	0.00453	1411	22	1410	18	1410	23
12	0.08267	0.00086	2.63828	0.02551	0.23146	0.00261	1261	10	1311	7	1342	14
13	0.07880	0.00080	2.20136	0.02089	0.20263	0.00226	1167	10	1181	7	1189	12
14	0.07867	0.00127	2.27181	0.03376	0.20944	0.00276	1164	13	1204	10	1226	15
15	0.07583	0.00059	2.01415	0.01484	0.19265	0.00202	1091	10	1120	5	1136	11
16	0.11558	0.00096	5.66448	0.04452	0.35544	0.00391	1889	10	1926	7	1961	19
17	0.08138	0.00094	2.39829	0.02570	0.21374	0.00248	1231	10	1242	8	1249	13
18	0.10935	0.00120	5.17131	0.05310	0.34298	0.00411	1789	10	1848	9	1901	20
19	0.10833	0.00159	4.92955	0.06713	0.33003	0.00450	1772	11	1807	11	1839	22
20	0.09645	0.00177	3.75226	0.06337	0.28216	0.00422	1557	14	1583	14	1602	21
21	0.09055	0.00116	1.86344	0.01414	0.14925	0.00155	1437	25	1068	5	897	9
22	0.22614	0.00315	18.66558	0.25434	0.59860	0.00953	3025	11	3025	13	3024	38
23	0.08518	0.00116	2.65947	0.03351	0.22643	0.00282	1320	11	1317	9	1316	15
24	0.09704	0.00216	3.69783	0.07562	0.27635	0.00469	1568	17	1571	16	1573	24
25	0.10652	0.00106	4.69160	0.04378	0.31940	0.00368	1741	10	1766	8	1787	18
26	0.18954	0.00254	14.71053	0.19083	0.56285	0.00841	2738	11	2797	12	2878	35
27	0.08592	0.00088	2.82209	0.02706	0.23820	0.00269	1336	10	1361	7	1377	14
28	0.10073	0.00162	4.32151	0.06460	0.31112	0.00439	1638	12	1697	12	1746	22
29	0.09664	0.00106	4.22343	0.04361	0.31692	0.00374	1560	10	1679	8	1775	18
30	0.09253	0.00104	3.55000	0.03703	0.27823	0.00327	1478	10	1538	8	1582	16
31	0.10121	0.00267	4.05861	0.09830	0.29079	0.00568	1646	20	1646	20	1645	28
32	0.09412	0.00149	3.60949	0.05266	0.27808	0.00381	1511	12	1552	12	1582	19
33	0.09693	0.00142	3.99445	0.05429	0.29883	0.00398	1566	12	1633	11	1686	20
34	0.07857	0.00112	2.34314	0.03091	0.21625	0.00271	1161	12	1225	9	1262	14
35	0.10643	0.00101	4.84187	0.04317	0.32988	0.00374	1739	10	1792	8	1838	18
36	0.08176	0.00177	2.25694	0.04454	0.20016	0.00312	1240	18	1199	14	1176	17
37	0.09304	0.00099	3.45920	0.03432	0.26960	0.00311	1489	10	1518	8	1539	16
38	0.10040	0.00121	4.14614	0.04645	0.29943	0.00367	1632	10	1663	9	1688	18
39	0.09584	0.00104	3.69291	0.03736	0.27940	0.00326	1545	10	1570	8	1588	16
40	0.07925	0.00142	2.49896	0.04120	0.22864	0.00320	1178	15	1272	12	1327	17
41	0.10005	0.00102	4.19971	0.04009	0.30436	0.00351	1625	10	1674	8	1713	17
42	0.07931	0.00091	2.33143	0.02481	0.21316	0.00246	1180	10	1222	8	1246	13
43	0.09687	0.00152	3.88039	0.05616	0.29043	0.00399	1565	12	1610	12	1644	20
44	0.08306	0.00092	2.80938	0.02910	0.24523	0.00283	1271	10	1358	8	1414	15
45	0.10320	0.00122	4.81062	0.05308	0.33798	0.00414	1682	10	1787	9	1877	20
46	0.07863	0.00115	2.28091	0.03075	0.21031	0.00265	1163	12	1206	10	1230	14
47	0.11323	0.00142	4.85386	0.03382	0.31090	0.00323	1852	23	1794	6	1745	16
48	0.07926	0.00092	2.40241	0.02592	0.21975	0.00255	1179	10	1243	8	1281	13
49	0.09463	0.00118	3.86584	0.04472	0.29618	0.00364	1521	10	1607	9	1672	18
50	0.09065	0.00130	3.33435	0.04404	0.26668	0.00345	1439	11	1489	10	1524	18
51	0.09368	0.00148	3.73731	0.05470	0.28922	0.00397	1502	12	1579	12	1638	20
52	0.07890	0.00147	2.28301	0.03900	0.20977	0.00298	1170	15	1207	12	1228	16
53	0.09508	0.00099	3.79473	0.03668	0.28934	0.00332	1530	10	1592	8	1638	17
54	0.09238	0.00192	3.50669	0.06707	0.27520	0.00440	1475	16	1529	15	1567	22
样品 12-OB3(浅变质泥质砂岩,直岘群五峰组)												
01	0.10071	0.00338	3.99922	0.07824	0.28760	0.00480	1637	16	1634	16	1630	24
02	0.11884	0.00121	5.74886	0.01570	0.35035	0.00137	1939	3	1939	2	1936	7
03	0.10061	0.00079	3.99462	0.02186	0.28757	0.00235	1635	8	1633	4	1629	12

续表 1

Continued Table 1

测点号	同位素比值						年龄(Ma)					
	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ
04	0.07914	0.00184	2.23647	0.06786	0.20469	0.00433	1176	30	1193	21	1200	23
05	0.10446	0.00157	4.77471	0.06109	0.33108	0.00419	1705	11	1780	11	1844	20
06	0.11169	0.00147	5.00169	0.05559	0.32437	0.00392	1827	10	1820	9	1811	19
07	0.10328	0.00172	4.42760	0.06727	0.31055	0.00443	1684	13	1718	13	1743	22
08	0.11157	0.00101	5.07499	0.03855	0.32953	0.00338	1825	9	1832	6	1836	16
09	0.11400	0.00119	5.67413	0.04113	0.36058	0.00327	1864	7	1927	6	1985	15
10	0.11082	0.00202	5.21343	0.04648	0.34082	0.00316	1813	8	1855	8	1891	15
11	0.10035	0.00214	4.02482	0.04900	0.29057	0.00328	1631	10	1639	10	1644	16
12	0.10160	0.00123	4.15413	0.01594	0.29622	0.00139	1654	4	1665	3	1673	7
13	0.08090	0.00158	2.38010	0.04294	0.21317	0.00315	1219	16	1237	13	1246	17
14	0.10211	0.00114	4.09417	0.04389	0.29053	0.00354	1663	10	1653	9	1644	18
15	0.10050	0.00116	4.21321	0.04605	0.30380	0.00367	1633	10	1677	9	1710	18
16	0.10103	0.00096	4.12475	0.04237	0.29586	0.00370	1643	11	1659	8	1671	18
17	0.10141	0.00176	4.29311	0.04320	0.30679	0.00302	1650	8	1692	8	1725	15
18	0.09945	0.00215	4.06056	0.05082	0.29590	0.00343	1614	10	1646	10	1671	17
19	0.09732	0.00161	3.61658	0.04438	0.26951	0.00298	1573	32	1553	10	1538	15
20	0.07927	0.00128	2.34592	0.01686	0.21449	0.00143	1179	6	1226	5	1253	8
21	0.10164	0.00162	4.18253	0.04699	0.29828	0.00333	1654	9	1671	9	1683	17
22	0.10263	0.00130	4.35211	0.05318	0.30737	0.00391	1672	11	1703	10	1728	19
23	0.11602	0.00107	5.43955	0.04278	0.33983	0.00357	1896	9	1891	7	1886	17
24	0.07913	0.00150	2.11456	0.06262	0.19371	0.00427	1175	28	1154	20	1141	23
25	0.08576	0.00097	2.71227	0.04240	0.22926	0.00371	1333	14	1332	12	1331	19
26	0.10958	0.00111	4.82500	0.03943	0.31921	0.00329	1792	9	1789	7	1786	16
27	0.10492	0.00198	4.49317	0.04414	0.31046	0.00303	1713	8	1730	8	1743	15
28	0.10904	0.00229	4.89909	0.05177	0.32572	0.00343	1783	9	1802	9	1818	17
29	0.10948	0.00120	5.06822	0.01567	0.33564	0.00138	1791	4	1831	3	1866	7
30	0.09458	0.00084	3.60256	0.02951	0.27615	0.00297	1520	9	1550	7	1572	15
31	0.09206	0.00151	3.44488	0.05001	0.27134	0.00361	1469	12	1515	11	1548	18
32	0.08973	0.00113	3.22059	0.04167	0.26026	0.00340	1420	11	1462	10	1491	17
33	0.10063	0.00145	4.00694	0.05205	0.28874	0.00372	1636	11	1636	11	1635	19
34	0.09946	0.00114	3.86424	0.04184	0.28174	0.00343	1614	10	1606	9	1600	17
35	0.09706	0.00156	3.84238	0.05834	0.28706	0.00400	1568	13	1602	12	1627	20
36	0.10208	0.00190	4.14241	0.04353	0.29428	0.00303	1662	9	1663	9	1663	15
37	0.10008	0.00221	4.49319	0.05219	0.32560	0.00348	1626	10	1730	10	1817	17
38	0.08858	0.00136	2.96477	0.01720	0.24273	0.00144	1395	5	1399	4	1401	7
39	0.09664	0.00108	3.74518	0.04523	0.28107	0.00380	1560	11	1581	10	1597	19
40	0.08606	0.00101	2.77387	0.03133	0.23377	0.00282	1340	10	1349	8	1354	15
41	0.09113	0.00135	3.20848	0.04854	0.25535	0.00361	1449	13	1459	12	1466	19
42	0.10768	0.00137	5.03840	0.04076	0.33935	0.00311	1761	7	1826	7	1884	15
43	0.09171	0.00111	3.34238	0.03603	0.26433	0.00305	1461	10	1491	8	1512	16
44	0.07897	0.00106	2.31351	0.04632	0.21248	0.00386	1171	18	1216	14	1242	21
45	0.09864	0.00268	4.02595	0.06238	0.29605	0.00402	1599	13	1639	13	1672	20
46	0.07793	0.00190	2.19750	0.04192	0.20454	0.00291	1145	18	1180	13	1200	16
47	0.17886	0.00118	12.50992	0.01497	0.50734	0.00133	2642	3	2643	1	2645	6
48	0.08353	0.00094	2.61285	0.03201	0.22690	0.00298	1282	11	1304	9	1318	16
49	0.09372	0.00078	3.55978	0.02129	0.27555	0.00233	1502	8	1541	5	1569	12
50	0.09760	0.00128	3.84278	0.04852	0.28564	0.00370	1579	11	1602	10	1620	19
51	0.09086	0.00131	3.20768	0.03386	0.25612	0.00272	1444	9	1459	8	1470	14
52	0.08580	0.00156	2.64536	0.10464	0.22366	0.00588	1334	39	1313	29	1301	31
53	0.11380	0.00076	5.34940	0.02219	0.34102	0.00245	1861	7	1877	4	1892	12
54	0.10673	0.00240	4.78797	0.05504	0.32545	0.00363	1744	10	1783	10	1816	18

表 2 祥原超群碳酸盐岩碳、氧同位素值

Table 2 Carbon and oxygen isotope compositions of carbonates from the Sangwon Supergroup

群/组	样品号	$\delta^{13}C$ (VPDB)	$\delta^{18}O$ (VPDB)
平城地区			
默川群/马田组	12-MK5	-5.0	-10.1
	12-MK4	-4.4	-11.3
	12-MK3	-2.2	-10.6
	12-MK2	-1.3	-11.8
	12-MK1	-0.96	-11.7
柯堂隅群/内洞组、五峰山组、半天组	12-Sd7	2.7	-4.7
	12-Sd6	2.6	-5.3
	12-Sd5	2.5	-6.3
	12-Sd4	2.2	-5.0
	12-Sd3	1.4	-4.9
	12-Sd2	2.7	-5.0
	12-Sd1	2.9	-10.4
	12-Sd1	2.8	-10.4
直岘群/桧仓租	12-CK3	2.5	-7.8
	12-CK2	1.4	-13.0
	12-CK2	1.4	-13.0
凤山地区			
柯堂隅群/德在山组	12-Dk4	3.3	-9.0
	12-Dk3	3.5	-10.3
	12-Dk2	2.6	-10.7
	12-Dk1	3.5	-10.4
柯堂隅群/云积山组	12-Un5	0.12	-12.6
	12-Un4	3.6	-7.7
	12-Un3	0.30	-16.1
	12-Un2	2.4	-12.5
	12-Un1	3.1	-13.0
直岘群/安心岭组	12-An4	1.3	-13.7
	12-An3	0.81	-13.8
	12-An2	0.85	-14.7
	12-An1	-0.76	-13.4
银波地区			
默川群/玉岘组	12-b-mk3-1	-9.7	-17.8
	12-b-mk3-1	-9.6	-17.7
	12-b-mk2-9	-5.6	-10.8
	12-b-mk2-7	-5.6	-10.7
	12-b-mk2-5	-5.5	-10.6
	12-b-mk2-3	-5.4	-10.8
	12-b-mk2-15	-5.3	-10.7
	12-b-mk2-13	-5.4	-10.3
	12-b-mk2-11	-5.5	-10.3
	12-b-mk2-1	-5.1	-10.8
柯堂隅群/青石头组	13-ch-25	3.7	-8.6
	13-ch-24	2.9	-9.4
	13-ch-23	3.8	-8.4
	13-ch-22	3.5	-8.0
	13-ch-21	2.9	-13
	13-ch-20	2.8	-6.2
	13-ch-19	2.6	-8.5
	13-ch-18	2.8	-7.8
	13-ch-17	1.9	-12
柯堂隅群/青石头组	13-ch-16	2.4	-8.2
	13-ch-15	2.7	-6.6
	13-ch-15	2.6	-6.4
	13-ch-14	2.4	-6.5
	13-ch-13	2.4	-8.3
	13-ch-12	2.3	-8.8
	13-ch-11	2.1	-9.9
	13-ch-10	2.1	-6.6
	13-ch-8	2.0	-8.9
	13-ch-5	2.1	-10.7
	13-ch-4	1.3	-8.3
	13-ch-2	0.8	-17.7
	13-ch-1	0.6	-8.7
柯堂隅群/德在山组	12-J-SD-102	0.6	-8.0
	12-J-SD-100	3.3	-8.3
	12-J-SD-95	2.3	-7.2
	12-J-SD-90	2.3	-9.5
	12-J-SD-87	1.3	-12.9
	12-J-SD-85	1.9	-9.2
	12-J-SD-84	2.2	-15.5
	12-J-SD-82	1.9	-7.2
	12-J-SD-80	2.2	-6.3
	12-J-SD-79	3.3	-7.6
	12-J-SD-78	3.2	-6.8
	12-J-SD-76	3.2	-9.0
	12-J-SD-73	3.0	-9.2
	12-J-SD-71	2.7	-10.4
	12-J-SD-69	1.8	-10.3
柯堂隅群/云积山组	12-J-SD-68	0.5	-5.8
	12-J-SD-65	1.4	-9.8
	12-J-SD-63	1.3	-6.0
	12-J-SD-60	1.9	-6.2
	12-J-SD-58	1.8	-6.9
	12-J-SD-55	3.0	-7.9
	12-J-SD-53	3.2	-8.6
	12-J-SD-51	1.1	-15.7
	12-J-SD-50	2.1	-13.7
	12-J-SD-49	2.8	-7.9
	12-J-SD-47	3.6	-6.8
	12-J-SD-45	2.3	-11.3
	12-J-SD-43	5.3	-6.6
	12-J-SD-40	4.5	-8.2
	12-J-SD-38	3.5	-9.0
	12-J-SD-35	4.9	-9.2
	12-J-SD-33	3.9	-10.2
	12-J-SD-31	2.4	-10.9
	12-J-SD-29	3.2	-11.3
	12-J-SD-27	3.7	-10.2
	12-J-SD-25	4.2	-6.9
	12-J-SD-22	4.2	-8.5
	12-J-SD-20	3.4	-8.3
	12-J-SD-17	3.3	-9.5

续表 2

Continued Table 2

群/组	样品号	$\delta^{13}C$ (VPDB)	$\delta^{18}O$ (VPDB)	群/组	样品号	$\delta^{13}C$ (VPDB)	$\delta^{18}O$ (VPDB)
祠堂隅群/云积山组	12-J-SD-16	3.4	-8.0	直岘群/五峰组	14-2-41N	0.6	-14.8
	12-J-SD-15	4.1	-7.5				
	12-J-SD-12	3.3	-8.2		14-2-39N	1.2	-15.2
	12-J-SD-10	3.6	-7.3		14-2-37N	0.2	-15.0
	12-J-SD-9	2.9	-8.4				
	12-J-SD-7	3.3	-7.2		14-2-37N	0.1	-15.2
	12-J-SD-7	3.4	-7.1				
	12-J-SD-5	3.1	-7.0		14-2-36N	0.8	-16.2
	12-J-SD-3	3.7	-12.1				
	12-J-SD-1	3.7	-8.0		14-2-35N	-0.2	-16.6

注：样品号顺序为地层自下而上，采样间距约 10 ~ 15m

祠堂隅群云积山组由下部的泥质石灰岩，块状石灰岩，中部的层状石灰岩，泥质石灰岩，块状石灰岩，白云质石灰岩，块状白云岩，上部的石灰岩与灰白色白云岩互层，白云质石灰岩组成。德在山组由块状白云岩，石灰质白云岩，白云质石灰岩组成。青石头组由暗灰色石灰岩，白云岩，泥质石灰岩组成。默川群玉岘组由薄层状肉红色-灰白色石灰岩组成。碳酸盐岩结晶程度低，无细脉穿插。

4 分析方法

4.1 锆石 U-Pb 同位素分析方法

将样品粉碎至 60 目以下，在双目镜下挑出锆石颗粒。将锆石颗粒粘在双面胶上，固定于透明的环氧树脂中，打磨抛光，分别照透射光、反射光和阴极发光照片，观察锆石的内部结构特征。用带有 Geolas 200M 激光剥蚀系统的 Agilent 7500a ICP-MS 同时原位测定锆石 U-Pb 同位素和元素含量。U-Pb 同位素的外标为哈佛大学的标准锆石 91500 作计算，其参考值加权平均$^{206}Pb/^{238}U$ 参考年龄为 1065.4 ± 0.6Ma (Wiedenbeck *et al.*, 1995)；元素含量的计算外标为硅酸盐玻璃 NIST SRM 610，内标为^{29}Si。年龄测试激光束斑直径为 40μm，剥蚀深度为 20 ~ 40μm。U-Pb 同位素和元素含量原始数据使用 GLITTER 4.0 软件进行处理。以上实验完成于在中国科学院地质与地球物理研究所。锆石的 U-Pb 年龄结果使用 Isoplot 3.0 软件(Ludwig, 2003)处理。年龄数据见表 1。

4.2 碳、氧同位素分析方法

所采的碳酸盐岩样品可能受到了后期蚀变作用影响。为了获取原始沉积的碳、氧同位素信息，在采样过程中尽量选择结晶度很低，无岩脉侵入，无后期方解石与石英细脉的样品。根据显微镜下观察选择比较新鲜的样品进行分析。碳酸盐岩样品绝大多数为石灰岩，有少量白云岩或者白云质灰岩夹层样品。所有样品研磨至 200 目以下，采用无水正磷酸法，制备供质谱分析的 CO_2 气体。白云岩和灰岩的反应温度为 25℃，反应时间分别为 24h 和 72h。CO_2 的 C、O 同位素分析是在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室 MAT-253 质谱仪上完成的。C、O 同位素组成分别以 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 表示，并且均相对于 VPDB (Vienna PeeDee Belemnite)国际标准。$\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 的标准偏差分别优于 0.15‰和 0.20‰。相关数据见表 2。

5 分析结果

5.1 锆石 U-Pb 年龄

4 件样品的锆石粒度为 50 ~ 100μm。锆石外形呈次圆状和次棱角状，指示磨圆较差和源区较近。锆石的 CL 图像揭示大部分锆石具有震荡环带，Th/U > 0.4，属于岩浆锆石(图 2)。4 件样品测试点的年龄分布于 3025 ~ 1091Ma，主要年龄峰值特征基本一致，4 件样品都显示了 ~ 1600Ma 和 ~ 1200Ma两个最主要的年龄峰值，此外还有其他较小的年龄峰值，如 ca. 1800 ~ 1900Ma 峰值等，也记录了少数 > 2500Ma

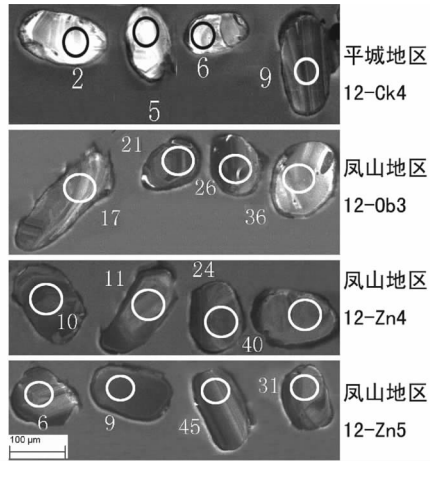

图 2 代表性样品碎屑锆石阴极发光(CL)照片

Fig. 2 Cathodoluminescence (CL) images of selected detrital zircons

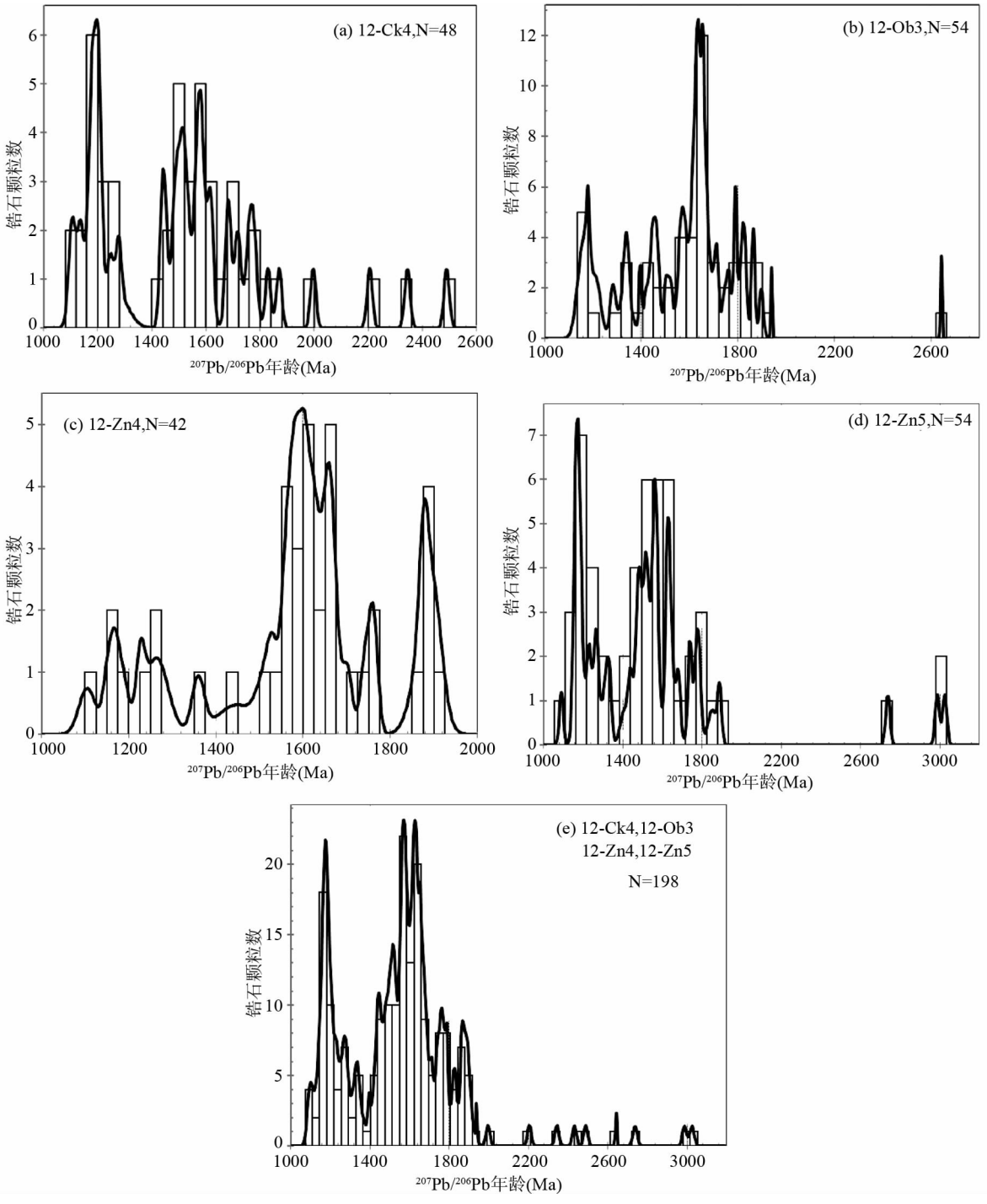

图 3 祥原超群直岘群碎屑锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄分布柱状图

(a)样品 12-Ck4(浅变质细粒长石石英砂岩,直岘群物金山组);(b)样品 12-Ob3(浅变质泥质砂岩,直岘群五峰组);(c)样品 12-Zn4(灰白色长石石英砂岩,直岘群长寿山组);(d)样品 12-Zn5(灰白色长石石英砂岩,直岘群长寿山组);(e)全部样品

Fig. 3 $^{207}Pb/^{206}Pb$ age histograms of the detrital zircons from the Jikhyon Group of the Sangwon Supergroup

的碎屑锆石年龄,但这些年龄非常少(图 3)。样品 12-Zn4(灰白色长石石英砂岩,直岘群长寿山组)似乎不同于另外 3 件样品:该样品有 ~1900Ma 的年龄峰值,其他样品没有。4 件样品中年龄最小的 4 个谐和年龄的平均值为 1100Ma(图 3)。

5.2 碳、氧同位素

祥原超群两件碳酸盐岩样品同时出现了极负的 $\delta^{13}C$

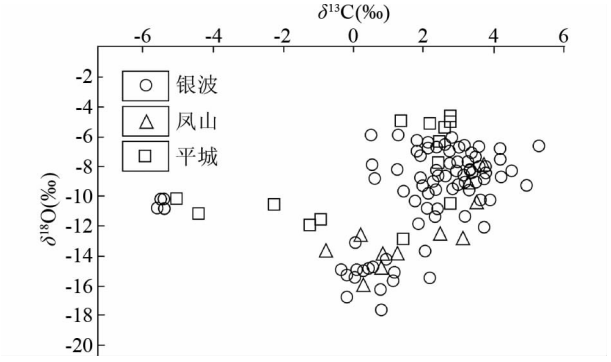

图 4 祥原超群碳酸盐岩样品 $\delta^{18}O$ 与 $\delta^{13}C$ 相关图

Fig. 4 Correlation diagram of $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$ of carbonates in the Sangwon Supergroup

(~ -10‰)和 $\delta^{18}O$ 值(~ -18‰),其他碳酸盐岩样品的碳同位素 $\delta^{13}C$ 值变化范围为 -6‰到 +6‰(表 2、图 4):从底部往上从直岘群安心岭组 0.6‰经过祠堂隅群 2.5‰变到默川群 -5.4‰。氧同位素 $\delta^{18}O$ 值变化范围为 -18‰到 -6‰,整体上与 $\delta^{13}C$ 值的相关性不明显(表 2、图 4)。

每个地区碳同位素 $\delta^{13}C$ 值变化趋势如下:平城地区("北部型")$\delta^{13}C$ 值从最底部直岘群桧仓租 1.4‰经过五峰山组 2.7‰到默川群马田组急剧变小到 -5.0‰;凤山郡北部("南部型")最底部直岘群安心岭组 -0.8‰开始逐渐变大到 1.8‰,经过云积山组中有 0.3‰ ~ 3.6‰的浮动性变化,到德在山组 3.3‰ ~ 3.5‰的比较高值;银波郡地区("南部型")碳同位素值从最底部直岘群五峰组 -0.2‰经过云积山组 3.7‰开始逐渐变化到 0.5‰,德在山组从 2.7‰开始逐渐变小到 1.3‰,青石头组从 2.3‰逐渐变大到 3.3‰之后急剧变小到 0.6‰,玉岘组从 -5.1‰开始经过 -5.6‰变化到 -5.3‰(表 2)。

6 讨论

6.1 祥原超群的沉积时限与物源分析

4 件样品中,样品 12-Zn4(灰白色长石石英砂岩,直岘群长寿山组)似乎不同于另外 3 件样品:该样品有 ~1900Ma 的年龄峰值,其他样品没有。不过,该样品与 12-Zn5 均属于直岘群长寿山组,为上下接触关系,因此,峰值的不同可能反映了物源区的不同。4 个样品中年龄最小的 4 个谐和年龄的平均值为 1100Ma,这些年龄最小的碎屑锆石表明直岘群形成晚于 1100Ma(图 3)。这一结果与 Hu *et al.* (2012)得到的沙里院附近直岘群碎屑锆石最大沉积年龄(~1000Ma)结果基本一致。年龄结果同时表明,平南盆地"北部型"与"南部型"直岘群碎屑锆石年龄峰值不存在明显差异,"北部型"与"南部型"直岘群基本一致。"北部型"与"南部型"祥原超群碳同位素变化趋势一致(图 5),这也表明平南盆地"北部型"与"南部型"地层在时代和物源方面不存在明显差异。

Peng *et al.* (2011a)在朝鲜中部沙里院附近侵入到灭恶山群的基性岩床中测得 899Ma 斜锆石年龄,说明祥原超群直岘群-默川群,以及部分灭恶山群的地层沉积早于这一年龄。不过,祥原超群第五个群——燕滩群里找不到类似基性岩床(Paek and Jon, 1996),说明部分地层可能年轻于岩床的侵位,或者基本同时。因此,我们认为,祥原超群的沉积时代应该归属拉伸纪早期(1000 ~ 900Ma),部分地层可能稍晚,与徐淮盆地和辽宁-吉林新元古代盆地(如旅大盆地)基本同期,支持 Peng *et al.* (2011b)提出的这些盆地属于同一个裂谷系的观点。

碎屑锆石的年龄峰值 ~ 1200Ma 很接近 Wu *et al.* (2007)报道的朝鲜中部瓮津花岗岩侵入年龄。峰值 ~1600Ma是最强的年龄值,Hu *et al.* (2012)同样报道了这一峰值,胡波等(2013)对华北克拉通北京西山地区寒武系和侏罗系碎屑锆石年龄测试中,也识别了 ~1600Ma 的峰值。但目前属于这个年龄段的地质体在朝鲜还没有找到,相似的年龄仅见于燕辽裂谷系的火山岩和基性岩墙中(Lu *et al.*, 2008; Peng, 2015)。1800 ~ 1900Ma 前后的年龄峰值与华北克拉通基底的年龄对应(胡波等, 2013)。另外,直岘群长寿山组灰白色长石石英砂岩(样品 12-Zn4)与其他样品年龄峰值略有差异,如,该样品没有 >2500Ma 的碎屑锆石年龄,但有 ~1900Ma 的年龄峰值,这些特征可能体现了物源的差异。

6.2 祥原超群碳同位素组成与全球早新元古代碳同位素负漂移

碳酸盐岩的氧同位素组成对蚀变作用灵敏,因为成岩后循环的大气降水、热液等流体与碳酸盐岩相互作用时最容易发生氧同位素的交换,使碳酸盐岩的 $\delta^{18}O$ 值明显降低(Kaufman and Knoll, 1995)。Bathurst (1975)认为,成岩作用可能造成样品的 $\delta^{18}O$ 值与 $\delta^{13}C$ 值之间有明显的正相关关系。但 Veizer *et al.* (1999)后来的研究表明,尽管成岩作用的确有可能导致 $\delta^{18}O$ 值与 $\delta^{13}C$ 值的正相关,但并不意味着 $\delta^{18}O$ 值与 $\delta^{13}C$ 值正相关就一定证明了岩石受到成岩作用的影响。虽然如此,祠堂隅群的大部分样品碳同位素 $\delta^{13}C$ 和氧同位素 $\delta^{18}O$ 值没有呈现正相关关系(图 4),表明没有受到后期强烈蚀变作用影响。除个别 $\delta^{13}C$ 值 ~10‰左右的样品,其 $\delta^{18}O$ 值最负,表明可能受到后期影响(表 2),其他碳同位素 $\delta^{13}C$ 值最负的样品(~5‰),其 $\delta^{18}O$ 值并不是最负的(图 4),这也表明这些样品可能记录了原始同位素组成。

图 5 将碳同位素数据与祥原超群的地层柱结合,可以得出祥原超群碳同位素组成随时间变化的趋势。可以看出从安心岭组碳同位素值的 0‰开始逐渐变大,到了祠堂隅群达到 5‰附近,从那以后逐渐变小,默川群玉岘组出现负值,达到 -5‰以下。默川群主体上略早于 ~900Ma(Peng *et al.*, 2011a),这一负漂移和摆动应略早于 ~900Ma,或为 950 ~ 900Ma(图 6)。

实际上,国外不少新元古代盆地沉积岩系中都记录了碳

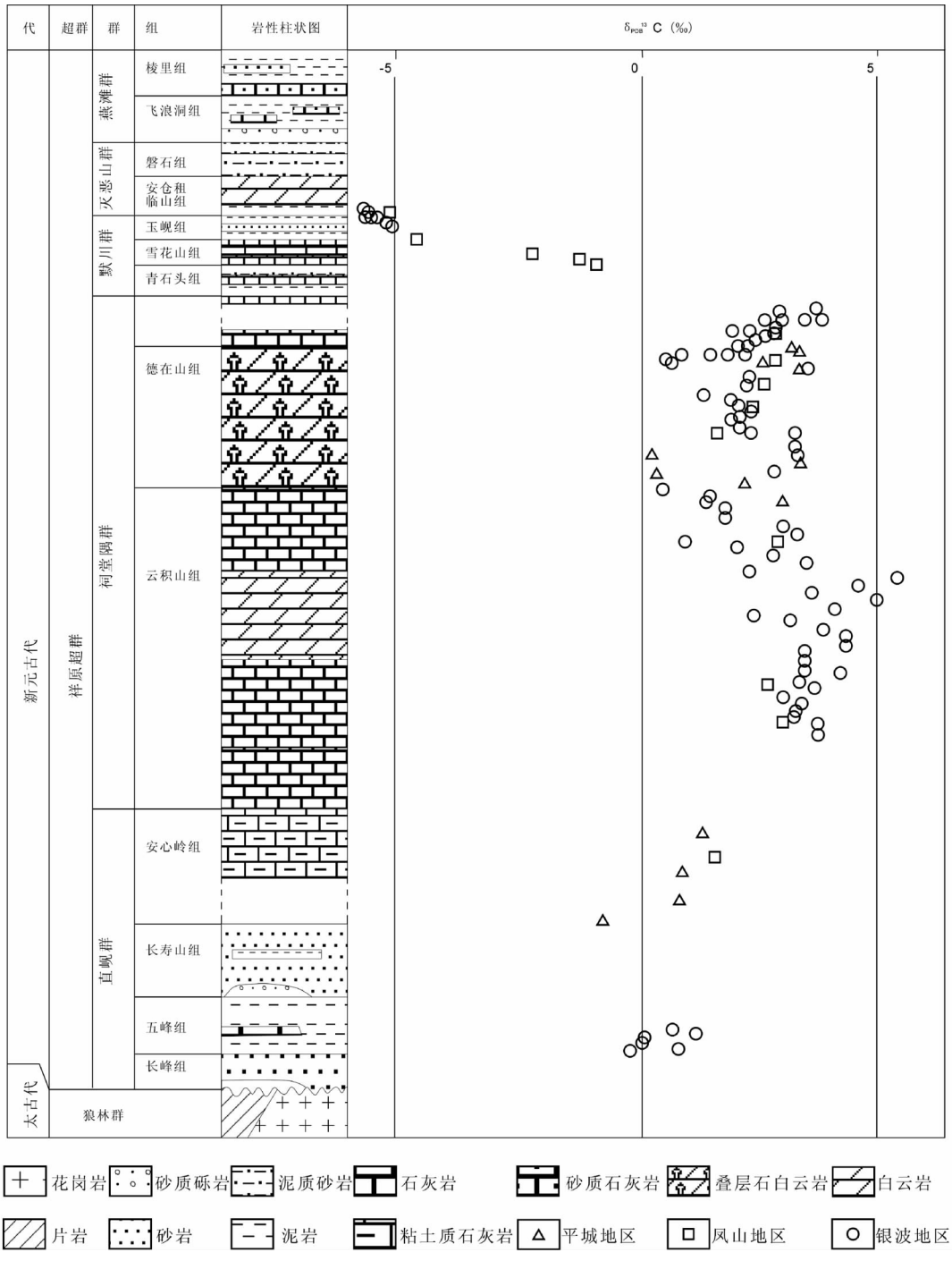

图 5 祥原超群值碳酸盐岩 $\delta^{13}C$ 值变化图

Fig. 5 The variation of the $\delta^{13}C$ values of the carbonate samples from the Sangwon Supergroup

同位素负漂移(Kaufman *et al.*, 1995; Hoffman *et al.*, 1998; Hill *et al.*, 2000; Halverson *et al.*, 2007a, b, 2010; Macdonald *et al.*, 2010)。Fairchild and Spiro (1987)报道了西非毛里塔利亚 Atar 群中出现的负漂移。Hoffman *et al.* (1998)总结 Namibia 地台碳同位素变化趋势时提出存在新元古代负漂移。Hill *et al.* (2000)在澳洲 Amadeus 盆地 Bitter Springs 组的 Gillen 段岩石中,也发现了碳同位素负偏移。Halverson *et al.* (2007a, b, 2010)认为这是全球性的碳同位素负偏移,与全球性海水位的变化有关,不是冰川事件的影响。不过,这一负偏移发生于新元古代 ~800Ma 前后(Kaufman and Knoll, 1995; Hoffman *et al.*, 1998; Kah *et al.*, 1999; Hill *et al.*, 2000; Halverson *et al.*, 2007a, b, 2010; Macdonald *et al.*, 2010)。这一年龄略微年轻于侵入到碳同位素出现负漂移的默川群的 ~900Ma 的基性岩床年龄(Peng

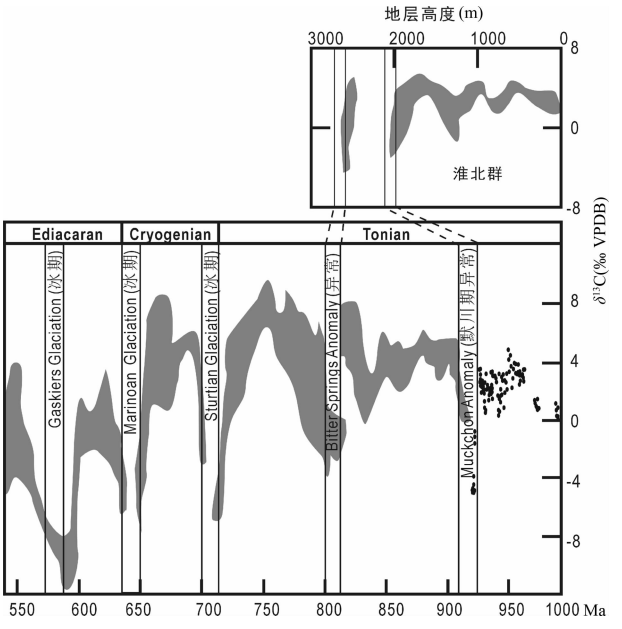

图 6 祥原超群碳同位素 $\delta^{13}C$ 值随时间变化趋势图

底图碳同位素数据引自 Macdonald *et al.* (2010)；淮北群(Huaibei Group)碳同位素数据引自 Xiao *et al.* (2014)；图中数据点为祥原超群碳同位素值

Fig. 6 The variation of the $\delta^{13}C$ values of carbonate samples from the Sangwon Supergroup

et al., 2011a)。Xiao *et al.* (2014)对华北克拉通东部的徐淮盆地中的淮北群碳酸盐岩碳同位素进行了分析，结合地层的年龄数据，提出沟后组的负漂移($\delta^{13}C$值接近 -5‰)对应于全球 Bitter Springs 阶段的碳同位素负漂移(<820Ma)，而史家组的碳同位素负漂移($\delta^{13}C$ 值接近 -3‰)对应 Halverson *et al.* (2010)总结的 920～800Ma 碳同位素负漂移。鉴于默川群玉岘组和淮北群史家组都有～900Ma 基性岩床侵入，并可进行对比(Peng *et al.*, 2011a)，我们认为玉岘组和史家组的碳同位素负漂移发生应早于 900Ma，或可与平南盆地 950～900Ma 的默川群负漂移对应，可能是新元古代第一次碳同位素负漂移(图 6)。长期以来，很多学者(华洪和曹瑞骥，2003；刘燕学等，2005；杨树杰，2009；张雷雷等，2010)认为华北旅大盆地和徐淮盆地(中)新元古代地层可以对比。Peng *et al.* (2011a, b)的研究表明，徐淮盆地、旅大盆地以及朝鲜平南盆地等可能属于同一个裂谷系。

研究认为 Bitter Springs 组碳同位素负漂移与 Rodinia 超大陆裂解过程中的火山活动有关(Hill *et al.*, 2000; Halverson *et al.*, 2007 a, b, 2010)。实际上，岩浆活动促使沉积物中赋存的甲烷被释放，而这些与细菌作用有关的甲烷通常富集^{12}C，释放到大气中的甲烷被氧化后溶解在水体中，降低水体中 $\delta^{13}C$ 值(Retallack and Jahren, 2008)。鉴于平南盆地默川群和徐淮盆地淮北群等的碳同位素负向漂移发生前，地层中都有基性岩床侵位，而且，同一时期华北发育大型基性岩墙群(～925Ma; Peng *et al.*, 2011a, b)，我们认为，这一负漂移有可能与岩浆活动相关。

7 结论

(1)综合碎屑锆石年龄以及碳同位素组成分析，我们认为朝鲜平南盆地祥原超群“北部型”和“南部型”地层不存在明显差异。

(2)祥原超群碎屑锆石年龄表明祥原超群沉积不早于 1100Ma，碎屑锆石年龄峰值与华北同时期其他盆地碎屑岩碎屑锆石年龄峰值一致。综合祥原超群碎屑锆石年龄和侵入其中的基性岩床斜锆石年龄、相关地层碳同位素变化以及前人的研究成果，推测祥原超群沉积于 1000～800Ma，与华北吉辽及徐淮地区新元古代地层可以进行对比。

(3)祥原超群碳酸盐岩碳同位素值 $\delta^{13}C$ 变化趋势从底部接近于 0‰，变化到 +3‰和 +4‰之间，到顶部 -6‰～-5‰。根据侵入到负向漂移地层(默川群)的基性岩床的时代，我们认为该碳同位素负漂移发生可能略早于 900Ma，早于～800Ma 的 Bitter Springs 负漂移，是新元古代第一次碳同位素负漂移。这次 $\delta^{13}C$ 负漂移的出现可能和～925Ma 前后的岩浆活动有关。

致谢 感谢储雪蕾研究员的修改意见。

References

Bathurst RG. 1975. Carbonate Sediments and Their Diagenesis. Amsterdam: Elsevier, 1-660

Broecker WS. 1970. A boundary condition on the evolution of atmospheric oxygen. Journal of Geophysical Research, 75(18): 3553-3557

Chu XL, Zhang TG, Zhang QR and Lyons TW. 2007. Sulfur and carbon isotope records from 1700 to 800Ma carbonates of the Jixian section, northern China: Implications for secular isotope variations in Proterozoic seawater and relationships to global supercontinental events. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71(19): 4668-4692

Fairchild IJ and Spiro B. 1987. Petrological and isotopic implications of some contrasting Late Precambrian carbonates, NE Spitsbergen. Sedimentology, 34(6): 973-989

Halverson GP, Dudás FÖ, Maloof AC and Bowring SA. 2007a. Evolution of the $^{87}Sr/^{86}Sr$ composition of Neoproterozoic seawater. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 256(3-4): 103-129

Halverson GP, Maloof AC, Schrag DP, Dudás FÖ and Hurtgen M. 2007b. Stratigraphy and geochemistry of a ca. 800Ma negative carbon isotope interval in northeastern Svalbard. Chemical Geology, 237(1-2): 5-27

Halverson GP, Wade BP, Hurtgen MT and Barovich KM. 2010. Neoproterozoic chemostratigraphy. Precambrian Research, 182(4): 337-350

Han RY and Park HU. 2011. Geology of Korea. Pyeongyang: Science and Encyclopedia Publishing House, 519-529 (in Korean)

Hayes JM, Kaplan IR and Wedeking KW. 1983. Precambrian organic geochemistry, preservation of the record. In: Schopf JW (ed.). Earth's Earliest Biosphere: Its Origin and Evolution. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 93-134

Hill AC, Arouri K, Gorjan P and Walter MR. 2000. Geochemistry of

marine and nonmarine environments of a Neoproterozoic cratonic carbonate/evaporite: The Bitter Springs Formation, central Australia. In: Grotzinger JP and James NP (eds.). Carbonate Sedimentation and Diagenesis in an Evolving Precambrian World. Tulsa: SEPM Special Publication, 67: 327 – 344

Hoffman PF, Kaufman AJ and Halverson GP. 1998. Comings and goings of global glaciations on a Neoproterozoic tropical platform in Namibia. GSA Today, 8(5): 1 – 9

Hu B, Zhai MG, Li TS, Li Z, Peng P, Guo JH and Kusky TM. 2012. Mesoproterozoic magmatic events in the eastern North China Craton and their tectonic implications: Geochronological evidence from detrital zircons in the Shandong Peninsula and North Korea. Gondwana Research, 22(3 – 4): 828 – 842

Hu B, Zhai MG, Peng P, Liu F, Diwu CR, Wang HZ and Zhang HD. 2013. Late Paleoproterozoic to Neoproterozoic geological events of the North China Craton: Evidences from LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Cambrian and Jurassic sedimentary rocks in Western Hills of Beijing. Acta Petrologica Sinica, 29(7): 2508 – 2536 (in Chinese with English abstract)

Hua H and Cao RJ. 2003. Neoproterozoic Stromatolite assemblages from the Shisanlitai stage and its significance in the regional and continental correlation. Journal of Stratigraphy, 27(1): 19 – 25 (in Chinese with English abstract)

Jang TS and Pak YC. 2000. Vendian (V) fossil of animal and plant found from Hwangju and Yonthan regions. Bulletin of Kim Il Sung University, 46(6): 100 – 103 (in Korean with English abstract)

Jang TS. 2001. On some new fossil animals discovered at the Kuhyon series and their geological significance. Geological Science, 4: 8 – 10 (in Korean with English abstract)

Jang TS and Pae PH. 2004. Studies on the new paleontological fossils of Kuhyon system of Rungri Formation and biostratigraphy. Bulletin of Kim Il Sung University, 4: 173 – 176 (in Korean with English abstract)

Kah LC, Sherman AG, Narbonne GM, Knoll AH and Kaufman AJ. 1999. $\delta^{13}C$ stratigraphy of the Proterozoic Bylot Supergroup, Baffin Island, Canada: Implications for regional lithostratigraphic correlations. Can. J. Earth Sci., 36(3): 313 – 332

Kaufman AJ, Jacobsen SB and Knoll AH. 1993. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: Implications for tectonics and paleoclimate. Earth Planet. Sci. Lett., 120(3 – 4): 409 – 430

Kaufman AJ and Knoll AH. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications. Precambrian Research, 73(1 – 4): 27 – 49

Kaufman AJ, Knoll AH, Semikhatov MA, Grotzinger JP, Jacobsen SB and Adams W. 1996. Integrated chronostratigraphy of Proterozoic-Cambrian boundary beds in the western Anabar region, northern Siberia. Geological Magazine, 133(5): 509 – 533

Kim BS. 2012. Characteristics of Paleozoic sedimentary from East China-Korean Peninsula and its tectonic evolution. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 65 – 66 (in Chinese with English summary)

Liu YX, Kuang HW, Meng XH, Ge M and Cai GY. 2005. The Neoproterozoic stratigraphic correlation framework in the Jilin-Liaoning-Xuzhou-Huaiyang area. Journal of Stratigraphy, 29(4): 387 – 404 (in Chinese with English abstract)

Lu SN, Zhao GC, Wang HC and Hao GJ. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China craton: A review. Precambrian Research, 160(1 – 2): 77 – 93

Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot/EX Version 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1 – 71

Macdonald FA, Schmitz MD, Crowley JL, Roots CF, Jones DS, Maloof AC, Strauss JV, Cohen PA, Johnston DT and Schrag DP. 2010. Calibrating the Cryogenian. Science, 327(5970): 1241 – 1243

Paek RJ *et al*. 1987. Geology of Korea. Science and Encyclopedia Publishing House, 5 – 17 (in Korean)

Paek RJ and Jon GP. 1996. Geology of Korea. DPR of Korea, Institute of Geology, State Academy of Sciences (ed.). Pyeongyang: Foreign Language Book Publishing House, 31 – 51

Park MH, Ri SB, Kim CJ and O CS. 2002. Litho-paleogeography during deposition of Sadangu Series in Middle Proterozoic era. Bulletin of Kim Il Sung University, 5: 137 – 140 (in Korean with English abstract)

Park MH, Ri SB and Kim CG. 2006. Litho-paleogeography in the period of deposition of Solhwasan System of Mukchon Series in Upper Proterozoic era. Bulletin of Kim Il Sung University, 9: 160 – 162 (in Korean with English abstract)

Park YC and So KS. 2002. New species of microfossil (Algae) found in the Rungri Formation, Upper Proterozoic, distributed on Kuhyon Pass of the Hukgyori, Hwangju County. Geological Science, 4: 14 – 16 (in Korean with English abstract)

Park YC and So KS. 2010. Some species of microplant fossils from the upper part of Upper Proterozoic strata. Bulletin of Academy of Sciences, 1: 44 – 45 (in Korean with English abstract)

Park MH. 2006. Principle of stratum division and stratigraphic chart of Korea. Bulletin of geological society of Korea, 1: 2 – 9 (in Korean)

Park MH. 2012. Geological Series of Korea. Pyongyang: Industrial Publishing House, 309 – 363 (in Korean)

Peng P, Zhai MG, Li QL, Wu FY, Hou QL, Li Z, Li TS and Zhang YB. 2011a. Neoproterozoic (~900Ma) Sariwon sills in North Korea: Geochronology, geochemistry and implications for the evolution of the southeastern margin of the North China Craton. Gondwana Research, 20(1): 243 – 254

Peng P, Bleeker W, Ernst RE, Söderlund U and McNicoll V. 2011b. U-Pb baddeleyite ages, distribution and geochemistry of 925Ma mafic dykes and 900Ma sills in the North China craton: Evidence for a Neoproterozoic mantle plume. Lithos, 127(1 – 2): 210 – 221

Peng P. 2015. Precambrian mafic dyke swarms in the North China Craton and their geological implications. Science China (Earth Science), 58(5): 649 – 675

Retallack GJ and Jahren AH. 2008. Methane release from igneous intrusion of coal during Late Permian extinction events. Journal of Geology, 116: 1 – 20

Ri SD and Pak YC. 2005. The organic microfossils from the Mukchon bed of SoHung-lake area and their geologic age. Bulletin of Kim Il Sung University, 2: 159 – 161 (in Korean with English abstract)

Ri SR, O JK and Jong SK. 1988. Some hiatus surfaces classified in Sangwon System and stratigraphical position. Geology and Geography, 4: 2 – 5 (in Korean with English abstract)

Riu JR, Paek YS and Ham BS. 1990. Geological Composition of Korea. Pyongyang: Industry Press, 174 – 195 (in Korean)

Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden GAF, Diener A, Ebneth S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha OG and Strauss H. 1999. $^{87}Sr/^{86}Sr$, $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ evolution of Phanerozoic seawater. Chemical Geology, 161(1 – 3): 59 – 88

Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Von Quadt A, Roddick JC and Speigel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. Geostandards Newsletter, 19(1): 1 – 23

Wu FY, Han RH, Yang JH, Wilde SA, Zhai MG and Park SC. 2007. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. Chemical Geology, 238(3 – 4): 232 – 248

Xiao SH, Shen B, Tang Q, Kaufman AJ, Yuan XL, Li JH and Qian MP. 2014. Biostratigraphic and chemostratigraphic constraints on the age of Early Neoproterozoic carbonate successions in North China. Precambrian Research, 246: 208 – 225

Yang SJ. 2009. Study of the Neoproterozoic character of stratum development of south Liaodong peninsula. Master Degree Thesis. Shandong University of Science and Technology, 1 – 64 (in Chinese with English summary)

Zhang LL, Zhang LP and Hu YL. 2010. Constrast and study on forming stage of Neoproterozoic and stratigraphic division in Jilin Province, Liaoning Province and Xuzhou-Huaihe River region. Shandong Land and Resources, 26(7): 8 – 12 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

胡波，翟明国，彭澎，刘富，第五春荣，王浩铮，张海东. 2013. 华北克拉通古元古代末-新元古代地质事件——来自北京西山地区寒武系和侏罗系碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学的证据. 岩石学报 29(7)：2508－2536

华洪，曹瑞骥. 2003. 新元古代十三里台期叠层石组合的地层对比意义. 地层学杂志，27(1)：19－25

金炳成. 2012. 中国东部-朝鲜半岛古生代沉积特征及构造演化. 博士学位论文. 长春：吉林大学，65－66

刘燕学，旷红伟，孟祥化，葛铭，蔡国印. 2005. 吉辽徐淮地区新元古代地层对比格架. 地层学杂志，29(4)：387－404

杨树杰. 2009. 辽东半岛南部新元古代地层发育特征研究. 硕士学位论文. 青岛：山东科技大学，1－64

张雷雷，张丽萍，胡玉玲. 2010. 吉辽徐淮地区新元古代形成时代及地层划分对比研究. 山东国土资源，26(7)：8－12