

台湾における海底湧水採取の試み

陳 鎮 東*・張 勁**†・彭 宗 仁***・萩 原 崇 史**

(2004年9月3日受付, 2005年7月3日受理)

Exploratory Sampling of Submarine Groundwater Discharge in Taiwan

Chen-Tung Arthur CHEN*, Jing ZHANG**†,
Tsung-Ren PENG*** and Takashi HAGIWARA**

- * Institute of Marine Geology and Chemistry, National Sun Yat-Sen University,
Kaohsiung, 804 Taiwan
** Faculty of Science, Toyama University
Gofuku, Toyama 930-8555, Japan
*** Department of Soil Environmental Science, National Chung Hsing University,
Taichung, 402 Taiwan
† Corresponding author (jzhang@sci.toyama-u.ac.jp)

There are many emerging reports that submarine groundwater discharge (SGD) may contribute much nutrient to the coastal zone (Taniguchi *et al.*, 1993, 2002; Church, 1996; Burnett, *et al.*, 2001, 2003; Zhang and Satake, 2002; Kim *et al.*, 2003). Chen (2002) has also suggested that alkalinity generated on the continental shelves may be as important as those generated in the global open oceans. SGD may be an important source of alkalinity and carbon to the continental shelves but the current biogeochemical models (e.g. Chen and Wang, 1999) do not properly include contributions from SGD because of the lack of data. In fact, SGD has not been measured in most coastal areas of the world. No such data have been published in Southeast Asia where rainfall is abundant and SGD is to be expected.

The subtropical island of Taiwan enjoys a high rainfall (av. 2,515 mm or $90 \times 10^9 \text{m}^3$ a year between 1949 and 1990 for the island of 35,873 km² in size). However, the areas of steep mountain terrain above 1,000 m elevation cover 32% of the island and 156 peaks stand taller than 3,000 m. Further, hills and terraces between 100 and 1,000 m elevation comprise 31% of the island. Because of the rough topography, rivers are short and most rainwater reaches the oceans within a very short time. As a result, rivers supply only one third of the total water consumption on Taiwan. As reservoirs are all small, combined together they account for only one fourth of the water supply. The major source of freshwater turns out to be groundwater. The usage of groundwater started in 1923 when the Taiwan Sugar Co. drew water in the Pingtung Plain in southwestern Taiwan. Over two hundred thousand wells have since been drilled. Unfortunately, such groundwater pumping amounts to over $7 \times 10^9 \text{m}^3$ a year compared to an annual recharge rate of merely $4 \times 10^9 \text{m}^3$ (Wei, 2000; Chen *et al.*, 2004a).

* 中山大学海洋地質化学研究所
高雄, 804 台湾
** 富山大学理学部
〒930 8555 富山市五福3190
*** 中興大学土壤環境科学系
台中, 402 台湾

† 連絡先 (jzhang@sci.toyama-u.ac.jp)
注: この論文はもともと英文で投稿されましたが, 本誌に掲載するにあたり, 和訳をつけてもらったものです (編集委員会)。

Because of overdrafting of groundwater, especially in the flat coastal plains in western Taiwan, over 1,000 km² of coastal land has subsided and seawater has started to intrude since 1980 (CGS, 2002). It is thus understandable that no one has attempted to directly sample the SGD in Taiwan although there are indications based on oceanographic or groundwater balance data that SGD may exist (CGS, 2002; Lin *et al.*, 2003). Groundwater balance data, however, are highly variable and signals based on water column measurements in the oceans are weak. The present authors believed that, at least, there should be isolated places in Taiwan where there is a surplus of groundwater. In addition, even when there is an overdrafting of groundwater on the annual basis, during the raining season there maybe a surplus of groundwater which may find its way into the oceans. It was thus decided to do an exploratory investigation of SGD in Taiwan.

Preliminary Results

(1) Kaohsiung City

Borosilicate glass ampules with valves on both ends were buried in sand at several places along a section of the Kaohsiung Coast (Fig. 1, A) from low tide on 22 July to low tide on 23 July, 2004. These ampules were placed at a water depth of about 30 cm when the water reached the lowest level, and the water depth was about 70 cm at high tide. The salinity of three samples collected at Xiziwan where a small creek enters averaged 1.85 ± 2.29 below the seawater above. Three samples collected at Shousan where there is no riverine outflow averaged 1.09 ± 1.09 lower than the overlaying seawater.

The average NO₃, NO₂, PO₄ and SiO₂ were, respectively, 2.8 ± 4.6 , 0.5 ± 0.9 , 1.76 ± 1.65 and 18.5 ± 23.4 μmol/kg higher than the seawater at Xiziwan. At the Shousan site the average NO₃, NO₂, PO₄ and SiO₂ were, respectively, 1.8 ± 0.8 , 0.07 ± 0.08 , 0.19 ± 0.18 , and 34 ± 41 μmol/kg higher than the overlaying seawater. The average pH was 0.26 ± 0.17 lower at Xiziwan, and 0.18 ± 0.01 pH units lower at Shousan. The above experiment was repeated at Shousan between the low tides on 2 August and 3 August, 2004. Samples from four ampules averaged 0.74 ± 0.06 and 0.30 ± 0.48 , respectively, lower than the overlaying seawater in terms of salinity and pH. On the other hand, the average NO₃, NO₂, PO₄ and SiO₂ of the four samples were 6.4 ± 9.0 , 0.34 ± 0.25 , 0.19 ± 0.08 , and 33.3 ± 18.9 μmol/kg higher than the seawater. These were the first indications that some fresher but nutrient-rich groundwater may have seeped out of the ocean floor at the sampling site.

Results based on buried ampules were confirmed on 3 Aug. 2004 when a SGD collecting device (Zhang and Satake, 2003) was employed at Xiziwan. A replicate of five samples were taken at a water depth of about 40 cm and the salinity varied between 19.7 and 22.8. The composite SGD sample had the salinity 11.82 lower than the overlaying seawater, and the pH was 0.14 lower. On the other hand, the PO₄ and SiO₂ of the SGD were, respectively, 0.55 and 239 μmol/kg higher. Another SGD sample taken at about 50 cm water depth yielded a salinity only 2.67 lower than the seawater. The NO₃ (62.1 μmol/kg) and NO₂ (1.61 μmol/kg) concentrations, however, were much higher than the seawater (NO₃ = 2.70, NO₂ = 0.55 μmol/kg). In fact, a freshwater well only about 40 m from the shoreline has similar NO₃ and NO₂ concentrations as the SGD. More detailed studies are needed in order to elucidate the interplays among groundwater, well water, outflow from the creek, seawater and the SGD. Real time conductivity measurements in the Tomidai-SGD flux chamber (Zhang and Satake, 2003), however, confirmed that fresher SGD indeed seeped out.

(2) Kaoping River Estuary

The Kaoping River, with a drainage area of 3,257 km² and a mean annual runoff of 8.5×10^9 m³, is the largest in Taiwan and is the major water resource of the Pingtung Plain (Fig. 1, B). No low-salinity SGD sample was taken but the flux chamber indicated that fresher water indeed seeped out at the Linyuansite. Seawater intrusion has frequently been reported for this area. As the sampling was done during the rainy season how representative it was remains to be studied.

(3) Fangsan

The small town of Fangsan (Fig. 1, C) is located at the southern end of the Pingtung Plain

where severe seawater intrusion has been reported (e.g. Peng *et al.*, 2000). Essentially pure groundwater was first sampled on 5 August, 2004, 300 m off the coast of Fangsan at a water depth of 7.8 m (Fig. 2). This sample had a salinity of 0.2 which is even lower than the typical lake water ($S = 0.5$) in Taiwan (Chen *et al.*, 2004b). Fifty meters south and north of this site, hereby named St. Eureka, the SGD was sampled at a similar depth and the salinities were, respectively, 2 and 5.6. Fifty meters further north the SGD had a salinity of 28. Two additional SGD samples were taken between St. Eureka and the coast. The one 50 m away from the coast (water depth 3 m) had a salinity of 3.2 and the one 200 m from the coast (water depth 6.4 m) had a salinity of 12.3.

(4) Jinshawan and Yanliao

A few SGD samples with salinity as low as 24.8 and nitrate 75 times higher than the seawater value were taken (Fig. 1 D: Jinshawan; E: Yanliao), and the flux chamber detected SGD seepage. The results will be reported elsewhere.

Conclusions

Although samples are still being analyzed, it may now be safely concluded that even in Taiwan where groundwater is highly overdrafted, SGD exists. The present authors of course chose the sites where SGD was most likely to be found, and samples were taken during the raining season. Nevertheless, it is important to point out that even near the Kaoping River estuary where seawater intrusion has frequently been reported, submarine discharge of groundwater, perhaps recirculated, still occurs. A large scale investigation is warranted.

Acknowledgement

The authors wish to thank K. Asai and K. Hasegawa of Geo-Science Laboratory, Nagoya, Japan; K. M. Huang, B. J. Wang and Seawatch Co. Taipei for assistance in sampling. We are also grateful to the editor and anonymous reviewer for their valuable comments and helpful advice. Financial support was provided by NSC 93-2621-Z 110-004, 93-2621-Z 005-002 and partly supported by the Japan Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Grant-in-Aid for Scientific Research (No. 16681004).

Key words: Submarine groundwater discharge, Exploratory sampling, Nutrients, Flux chamber

沿岸海底湧水 (SGD) が沿岸域の栄養塩供給に大きく寄与している報告は数多く見られる (Taniguchi *et al.*, 1993, 2002; Church, 1996; Burnett *et al.*, 2001 and 2004; Zhang and Satake, 2002; Kim *et al.*, 2003)。また, Chen (2002) は, 陸水と外洋水の混合により陸棚で形成されたアルカリティ度は, 外洋水のそれと同様に陸棚域での陸水の挙動を解析する上で重要であると指摘している。SGD は陸棚において重要なアルカリ源と炭素源としての可能性があるにもかかわらず, データ量が不足しているため現有の生物地球化学モデル (例, Chen and Wang, 1999) では, SGD に関連した情報を適切に扱うことができていない。実際, 世界のほとんどの沿岸域では, SGD が未だ測定されておらず, 降雨量が多く SGD の存在や重要性が予想される東南アジアでさえ, SGD に関するデータはまだ発表されていない。

亜熱帯の島である台湾は, 豊富な降雨量に恵まれて

いる (島の面積 $35,873 \text{ km}^2$, 1949年から1990年の年間平均降雨量は $2,515 \text{ mm}$, 年間総降水量は $90 \times 10^9 \text{ m}^3$)。また, 標高 $1,000 \text{ m}$ 以上の険しい山地が国土面積の 32% を占め, 標高 $3,000 \text{ m}$ を越える山が 156 箇所もあり, 海拔 100 m から $1,000 \text{ m}$ の丘陵と台地が 31% を占める。このように, 地形が険しく急峻のため河川は短く, ほとんどの雨水は短時間で海に流出してしまう。その結果, 台湾では河川による淡水の供給量は総水消費量の $\frac{3}{10}$ にすぎない。また, 貯水池も小規模なものがほとんどで, すべてを合わせても水供給量の $\frac{4}{10}$ にしかならない。したがって, 今日では地下水が重要な淡水源となっている。

台湾における地下水利用の歴史は浅く, 1923年に台湾製糖株式会社が台湾南西部の屏東 (Pingtung) 平野で水を汲み始めたことが最初である。以来, 20 万本以上の井戸が掘られてきた。残念なことに, 現在井戸による地下水の年間汲み上げ量は $7 \times 10^9 \text{ m}^3$ を超え,

これに対して年間涵養量 (Recharge rate) はわずが $4 \times 10^9 \text{ m}^3$ であり (Wei, 2000; Chen *et al.*, 2004a), 地下水の塩水化が深刻な環境問題となりつつある。特に台湾西海岸の沿岸平野部において, 1980年以来, 地下水の過剰揚水によって $1,000 \text{ km}^2$ を越える地域が地盤沈下し, 地下水の塩水化が始まっている (CGS, 2002)。このような背景で, 海洋学的データ, あるいは地下水収支に関するデータから SGD 流出の可能性が示唆されるのにも関わらず, 台湾での SGD の研究は立ち後れているのが現状である (CGS, 2002; Lin *et al.*, 2003)。また, 地下水収支のデータはばらつきが大きく, さらに, 海洋観測結果に基づく SGD のシグナルは大変小さいのが現状である。しかし, 著者らは, 少なくとも局所の隔離された場所に余分な地下水が存在すると考えた。さらに, 毎年地下水が過剰揚水されても, 雨季には余分な地下水があり, これが SGD として海洋へ流出すると考えられるので, 台湾において SGD の採取を試みることにした。

結果速報

(1) 高雄市 (Kaohsiung City)

2004年7月22日の干潮時 (水深が約30 cm) から7月23日の満潮時 (水深は約70 cm) にかけて, 高雄市 (Kaohsiung City) の海岸 (Fig. 1, A) 数カ所の砂中に, 両端にバルブが付いたホウケイ酸ガラス製アンブルサンプラーを埋め SGD の採取を行った。小川が流れ込む西子湾 (Xiziwan) で採取した3つの試料の塩分は, 表層海水よりも平均 1.85 ± 2.29 低かった。河川の流入がない壽山 (Shousan) で採取した3試料は, 表層海水よりも平均 1.09 ± 1.09 低かった。

また, NO_3 , NO_2 , PO_4 , SiO_2 についてはそれぞれ, 2.8 ± 4.6 , 0.5 ± 0.9 , 1.76 ± 1.65 , $18.5 \pm 23.4 \mu\text{mol/kg}$ 西子湾 (Xiziwan) の表層海水よりも高かった。壽山 (Shousan) では, 平均 NO_3 , NO_2 , PO_4 , SiO_2 はそれぞれ, 1.8 ± 0.8 , 0.07 ± 0.08 , 0.19 ± 0.18 , $34 \pm 41 \mu\text{mol/kg}$ 表層海水よりも高かった。上述の実験を2004年8月2日と8月3日の干潮時間に壽山 (Shousan) で再度行った。得られた4つの試料の塩分と pH は, それぞれ表層海水よりも平均 0.74 ± 0.06 と 0.30 ± 0.48 低かった。一方, 4試料の平均 NO_3 , NO_2 , PO_4 , SiO_2 は 6.4 ± 9.0 , 0.34 ± 0.25 , 0.19 ± 0.08 , $33.3 \pm 18.9 \mu\text{mol/kg}$ であり, 表層海水よりも高かった。これらの結果は, 栄養塩豊富な地下水がサンプル採取地域の海底にしみ出た可能性を示唆するも

のであった。

上述したアンブルサンプラーと同様の結果は, 2004年8月3日, 西子湾 (Xiziwan) において SGD 採取装置 (Zhang and Satake, 2003) で採取した試料でも確認した (Table 1)。水深約40 cm の位置で採取した5試料では, 塩分が $17.7 \sim 22.8$ の範囲であった。最も塩分薄い SGD 試料の塩分は表層海水より 11.82 も低く, pH は 0.14 低かった。また, この SGD の PO_4 と SiO_2 はそれぞれ, 0.55 , $239 \mu\text{mol/kg}$ と高かった。一方, 水深約50 cm で採取した SGD 試料の塩分は, 海水より 2.67 だけ低かったが, NO_3 ($62.1 \mu\text{mol/kg}$) と NO_2 ($1.61 \mu\text{mol/kg}$) 濃度は海水よりはるかに高かった ($\text{NO}_3 = 2.70$, $\text{NO}_2 = 0.55 \mu\text{mol/kg}$)。実際, 海岸線からわずか40 m ほど陸側に離れた井戸水の NO_3 および NO_2 濃度は, SGD と類似していた。更に, SGD のサンプリングを行った一部の測点において, SGD フラックスチャンパー (萩原ほか, 2003) による電気伝導率測定の結果によって, より低塩分の SGD が実際に染み出していることが確認された。今後, 地下水, 井戸水, 河川による流出量, 海水および SGD 間の相互作用を解明するには, さらに詳細な研究が必要である。

(2) 高屏溪河口 (Kaoping River Estuary)

高屏溪は, 流域面積 $3,257 \text{ km}^2$, 年間平均流出量 $8.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ と台湾最大の河川で, 屏東 (Pingtung) 平野の重要な水源である (Fig. 1, B)。低塩分 SGD サンプルの採取に成功しなかったが, SGD フラックスチャンパーによって林園地域においても, 海底からの染み出しが示唆される結果が得られた。この地域では, 地下水の塩水化がしばしば報告され, 今回のサンプリングは, 雨季に実施されたことから, 今後季節変動に焦点を当てた研究の余地がある。

(3) 枋山 (Fangsan)

小部落の枋山 (Fig. 1, C) は屏東平野の南端に位置しており, 地下水への激しい海水浸入が報告されている (Peng *et al.*, 2000)。2004年8月5日に枋山の沖合300 m, 水深7.8 m の地点において, 淡水に近い地下水が採取された。この試料の塩分は 0.2 で, 台湾の典型的な湖水 ($S = 0.5$) よりもさらに低かった (Chen *et al.*, 2004b)。この位置から南北に50 m の地点において (Fig. 2) 同様な水深で SGD を採取したところ, 塩分はそれぞれ 2 と 5.6 であった。さらに, 50 m 北の SGD の塩分は 28 であり, 同じ測線に海岸から50 m 離れた位置 (水深3 m) の塩分は 3.2 海岸から200 m 離

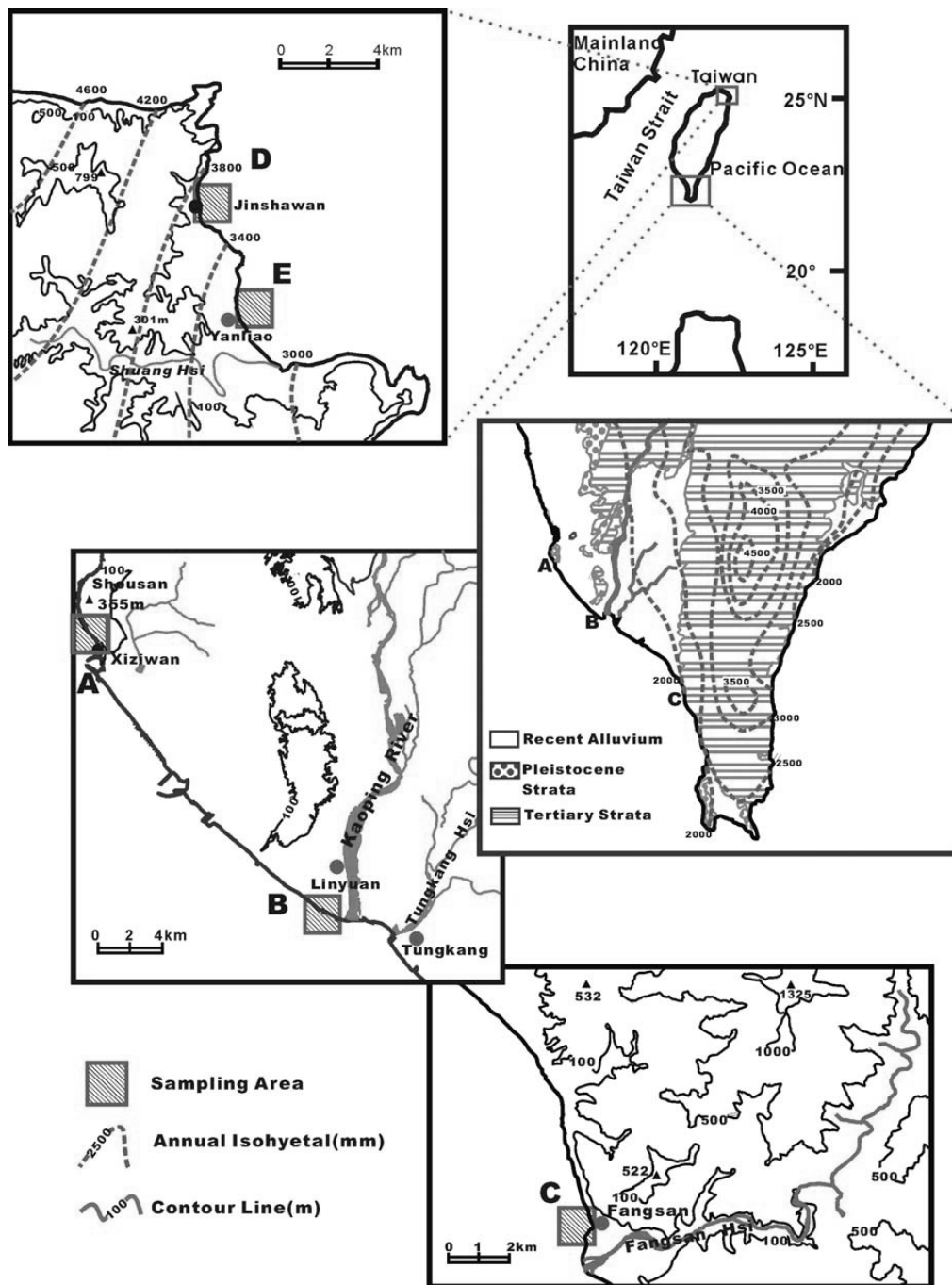


Fig. 1 Locations of the study area in Taiwan.

れた位置（水深6.4m）の塩分は12.3であった。

(4) 金沙湾（Jinshawan）と塩寮（Yanliao）

金沙湾（Jinshawan；Fig. 1, D）と塩寮（Yanliao；Fig. 1, E）では塩分が24.8，硝酸濃度が海水の75倍ものSGD試料が数個得られ，また，SGDフラックスチャンバーによって海底湧水の染み出しが検出された。この結果は流量データにあわせて別文で報告する

予定である。

結 論

試料分析およびデータ解析はまだ進行中であるが，現時点で言えることは，地下水の過剰揚水の著しい台湾ですら，SGDは存在している。当然のことながら，著者らはSGDの発見に可能性の高い場所を選び，試

Table 1 Average chemical data of seawater, river water, well water and SGD collected at Xiziwan.

	Sal.	pH	NO ₃	NO ₂	PO ₄	SiO ₂
Seawater (am)	32.605	8.03	1.93	0.66	0.52	22.10
(pm)	32.769	7.82	3.46	0.44	0.33	51.90
River water	0.518	7.64	24.3	11.5	45.0	208
Well water	0.543	7.51	58.4	0.65	0.12	335
SGD composite (40 cm water depth)	20.861	7.79	-	-	0.98	276
SGD composite (50cm water depth)	30.020	8.03	62.1	1.61	0.75	182

--: Outlier

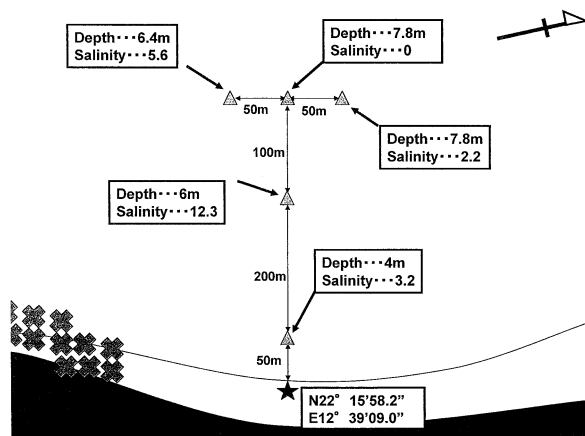


Fig. 2 Detailed illustration of the SGD sampling and experiments of SGD-Flux Chamber in Fangsan.

料も雨季に採取した。しかし、塩水侵入が頻繁に報告されている高屏溪河口近傍ですら、おそらく再循環によってであろうが、地下水が海底から湧出している。今後、より詳細かつ本格的な調査が必要であろう。

謝 辞

サンプル採集を行った地球科学研究所（名古屋市）の浅井和見氏と長谷川和宏氏，ならびにサンプル採取を援助して下さった台北探海有限公司および，中山大学の黄国銘先生と王冰潔先生に深く感謝致します。また，1名の匿名査読者から改善のコメントを頂き，心より感謝いたします。この研究は助成金 NSC 93 2621 Z 110 004と93 2621 Z 005 002の一部，及び日本科学研究費補助金・若手A研究16681004（代表：張勁）で行った。ここに記して感謝の意を申し上げます。

（和文責：張勁）

References

- Bokuniewicz, H., Buddemeier R., Maxwell, B. and Smith, C. (2003) The typological approach to submarine groundwater discharge (SGD). *Bio-geochemistry* **66**, 145 158.
- Burnett, W. C., Taniguchi, M. and Oberdorfer, J. (2001) Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone. *Journal of Sea Research* **46**, 109 116.
- Burnett, W. C., Bokuniewicz, H., Huettel, M., Moore, W. S. and Taniguchi, M. (2003) Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry* **66**, 3 33.
- Central Geological Survey (CGS) (2002) Taiwan Groundwater Monitoring Network Project Phase I: Pingtung Plain. Final Summary of Hydrogeology Investigation. *Ministry of Economic Affairs, Taipei, Taiwan*, 172 pp (in Chinese).
- Chen, C. T. A. (2002) Shelf vs. dissolution generated alkalinity above the chemical lysocline in the North Pacific. *Deep-Sea Res. II* **49**, 5365 5375, 2002.
- Chen, C. T. A. and Wang, S. L. (1999) Carbon, alkalinity and nutrient budget on the East China Sea continental shelf. *J. Geophys. Res.* **104**, 20675 20686.
- Chen, C. T. A., Liu, J. T. and Tsuang, B. J. (2004a) Island-based catchment-The Taiwan example. *Regional Environmental Change* **4**, 39 48.
- Chen, C. T. A., Wu, J. T., Wang, B. J. and Huang, K. M. (2004b) Acidification and trace metals of lakes in Taiwan. *Aquatic Geochemistry*, **10**, 33 57.
- Church, T. M. (1996) An underground route for the water cycle. *Nature* **380**, 579 580.
- Ho, L. Z., Wang, C. H. and Chen, C. T. A. (1990) Preliminary study of groundwater geochemistry in the Peikang area. *J. Environmental Protection Society of the Republic of China* **13**, 38 59 (in Chinese with English abs.).
- Kim, G. B. and Lee, K. K. (2003) Large submarine groundwater discharge (SGD) from a volcanic island. *Geophys. Res. Lett.* **30**, No. 21, 2098, doi:

- 10.1029/2003 GL 018378.
- Lin, I. T., Wang, C. H. and Lin, S. W. (2003) Seasonal variations of oxygen isotopic compositions in the Pingtung Coastal Waters of Taiwan. *Western Pacific Earth Sciences* **3**, 1, 21-32.
- Peng, T. -R., Liu, T. -S. and Guo, H. -Y. (2000) Groundwaters salinization in chemical compositions of coastal area in Pingtung Plain. *Soil and Environment* **3**, 353-362 (in Chinese with English abs.).
- Taniguchi, M. and Fukuo, Y. (1993) Continuous measurements of ground-water seepage using an automatic seepage meter. *Ground Water* **31**, 675-679.
- Taniguchi, M., Burnett, W. C., Cable, J. E. and Turner, J. V. (2002) Investigation of submarine groundwater discharge. *Hydrological Processes* **16**, 2115-2129.
- Wei, C. S. (2000) Taiwan's energy mineral and groundwater resources. *Central Geological Survey* 218 pp (in Chinese).
- Zhang, J. and Satake, H. (2002) Submarine groundwater seepage in Toyama. *Aquabiology* **24**, 294-301 (in Japanese).
- Zhang, J. and Satake, H. (2003) The chemical characteristics of submarine groundwater seepage in Toyama Bay, Central Japan. In: *Land and Marine Hydrogeology* (eds. M. Taniguchi, K. Wang and T. Gamo), Elsevier, 45-60.