한국습지학회논문집 제8권 제4호 · 2006년 12월 ‖ pp. 41 - 47

온도 증가와 염도 감소에 따른 갯벌토양에서 메탄발생량의 변화

Changes in Methane Production in Coastal Mud Flat under Different Temperature and Salinity

김 영 주* / 정 수 현** / 강 호 정***+

Young Joo Kim* / Soo Hyun Jung** / Hojeong Kang***+

:: Abstract ::

Global climatic changes are expected to influence various biogeochemical processes in wetland ecosystems. In particular, coastal mud flat is anticipated to be affected directly by temperature increase as well as indirectly by a sea level rise and changes in precipitation. This study aimed to determine changes in methane production under different temperature and salinity by employing a laboratory-scale manipulation experiment. Soil samples were collected from a mud flat in Dong-Gum Kang-Hwa island in winter and two types of experiments were conducted. In the first experiment soil samples at 0-5 cm, 5-10 cm depth were incubated under same salinity with pore water and diluted salinity to 50 % of natural condition for 20 days and methane production was measured every other days. In the second experiment, soil samples at 5-10 cm depth were incubated in different temperature, 5°C and 15°C, under same salinity conditions with first experiment for 31 days and methane production was measured. Results of the first experiment revealed that higher amount of methane was produced at 5-10 cm depth, and salinity effect was predominant at the end of the experiment. The second experiment showed that methane production was higher in 15°C than 5°C. In addition, methane production was higher when sea water diluted to 50 % compared to control. These results suggest that methane production is highly influenced by changes in temperature and salinity in coastal mud flat. And that global climatic change may induce biological feedback by affecting production of another greenhouse gas, namely methane from coastal mud flat.

Keywords: Mud flat, Methanogenesis, Global warming

+ Corresponding author, hjkang@ewha.ac.kr

* 이화여자대학교 공과대학 환경공학과

** 이화여자대학교 공과대학 환경학과

*** 교신저자·이화여자대학교 공과대학 환경학과

:: 요 지 ::

전 지구적 기후변화로 인하여 습지에서 일어나는 다양한 종류의 생지화학적인 순환에 큰 변화가 관측되고 있다. 특히, 갯벌의 경우 온도변화에 의한 직접적인 환경변화 뿐 아니라 해수면의 상승과 강수량의 변화라는 요인에 의해 간접적인 영향도 받을 것으로 예측된다. 본 논문에서는 온도와 해수의 염도 변화에 따라 갯벌에서 발생하는 메탄양의 변화를 실험실 규모의 실험을 통하여 규명하고자 했다. 시료는 겨울철 강화도 동검도 갯벌에서 채취하여 2 종류의 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험에서는 0-5 cm, 5-10 cm 깊이의 토양을 자연 상태의 염도와 50 % 희석한 염도 조건 하에서 20 일간 배양하며 2일 간격으로 메탄 발생량을 측정하였다. 두 번째 실험에서는 5-10 cm 깊이의 토양을 5° C, 15° C 에서 자연 상태의 염도와 50 % 희석한 염도 조건 하에서 31일간 배양하며 발생하는 메탄의 양을 하루 간격으로 측정하였다. 첫 번째 실험의 결과 5-10 cm 깊이의 토양에서 메탄이 더 많이 발생하며 염도의 영향은 배양 후반부로 가면서 크게 나타남을 알 수 있었다. 두 번째 실험 결과에서는 15° C에서 5° C에서 보다 더 많은 메탄이 발생하였고, 50 % 희석한 염도 조건에서 자연 상태의 염도 조건에서 보다 많은 메탄이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 갯벌에서의 메탄 생성율은 온도 상승과 해수의 화학적 특성의 변화에 따라 많은 영향을 받음을 보여준다. 또한 전 지구적 기후변화로 야기될 온도나 해수 염도의 변화가 메탄의 발생에 영향을 미쳐, 생물학적 되먹임 기작에도 변화가 일어날 것으로 사료된다.

핵심용어: 갯벌, 메탄생성작용, 지구온난화

1. 서 론

산업혁명 이후 경제발전과정에서 인간의 활동으로 인하여 화석연료의 사용이 증가하였고, 이에 따른 이산화탄소 발생량도 전 세계적으로 매년 300 만 톤씩 증가하고 있다(에너지경제연구원, 1995). UN 기후변화에 관한 정부패널(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)은 3차보고서에서 인간의 활동으로 인해 21세기 말까지 지구온난화가 지속되어 지구평균기온이 최대 5.8° C 해수면은 최대 88 cm 까지 상승할 것으로 예측하고 있다. 또한 지역에 따라 강수량의 증가 혹은 감소가 예상되며, 가뭄과 홍수의 빈도도 증가할 것으로 예상되고 있다.

이러한 변화가 생태계에 미칠 영향에 대해 많은 연구가 진행되고 있으나 대부분의 연구는 육상 생태계의 반응에 집중되어 있다(Ainsworth와 Long, 2005). 최근에 전 지구적 기후변화가 습지에 미치는 영향 대한 연구가 일부 진행되고 있는데, 이러한 연구 결과들은 용존 유기탄소의 생산, 온난화기체의 발생 등과 같이 전 지구적인 생지화학적 순환에 영향을 미칠 수 있는 생물학적 되먹임이 존재함을 보여주었다(Kang 등, 2001). 그러나 대부분의 습지연구는 식물체를 매개로 하여 일어나는 반응을 중심으로 수행되어(Dennison과 Berry, 1993) 갯벌과 같이 뿌리를 가진 식물이 존재하지 않는 지역에 대한 연구는 매우 드물다. 우리나라의 중요한 자연생태계로 평가되고 있는 갯벌은 수산생물 서식지 및 산란지 기능, 생물 다양성의 보고, 홍수 및 재해조절 기능, 오염정화 기능, 심미적 기능 등 생태/환경 및 산업적으로 주된 기능들을 보유하고 있다(해양수산부, 1998). (해양수산부, 1998) 보고서에서 적용한 미국의 연구사례에 따르면 오염정화의 기능은 환경적으로 중요한 가치로 평가되고 있다. 오염정화기능은 갯벌의 유기물 분해능으로 측정이 가능하며(현정호 등, 2004), 이는 대부분 혐기적인 상태에서의 미생물에 의한 호흡을 통해 일어나는 과정이다(Alongi, 1998). 갯벌에서 유기물 분해에 영향을 미치는 요인은 여러 가지가

있으며 물리-화학적 요인으로는 온도, 수위, 염도 등이 있다(Postgate, 2003). IPCC(2001) 3차보고서에 따르면 갯벌의 이러한 물리-화학적 요인들이 기후변화에 의해 영향을 받는 것으로 사료된다. 예를 들어, 대기 중 평균 온도의 상승은 갯벌 토양에 직접적인 환경 변화를 일으킬 수 있다. 또한, 강수량의 변화나 해수면의 상승으로 인하여 갯벌에 공급되는 해수 염도가 증가할 수도 있고, 감소할 수도 있다. 이러한 변화들은 갯벌에서 일어나는 유기물 분해능을 크게 변화시킬 것으로 예상된다. 예를 들어, 온도의 증가는 일반적으로 유기물 분해속도를 증대시키며, 수위의 증가는 혐기성 호흡을 증가시키고, 염도 중 특히 황산염의 증가는 메탄 발생량을 억제할 수 있다(Capone와 Kiene, 1988).

메탄의 동태가 큰 관심을 끄는 이유는 메탄이 이산화탄소에 비해 단위 몰 당 온난화 효과가 21 배에 달하며, 대기 중 농도가 산업혁명 이후 매년 1 % 가량씩 증가하고 있기 때문이다 (IPCC, 2001). 메탄의 동태에 관한 연구는 주로 내륙 습지에서 발생하는 양에 초점이 맞추어져 왔으나 (Megonigal과 Schlesinger, 2002) 연안 습지의 경우에도 지역적인 조건에 따라 상당부분의 메탄이 발생할 수 있을 것으로 추정된다.

본 연구에서는 이러한 점에 주목하여 국내 갯벌 토양에서 온도와 해수의 염도가 변화하였을 때 갯벌에서 발생하는 메탄양의 변화를 실험적으로 알아보고자 했다. 이를 위하여 강화도에서 채취한 갯벌 토양을 이용하여 두 가지의 배양 실험을 실시하여, 토양 깊이, 염도, 온도의 영향을 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역 및 시료 채취

연구대상 지역인 강화갯벌은 한강, 임진강, 예성강 하구에 위치하여 토사의 유입이 많고 평균 대조차가 약 8 m에 달하는 지역으로 부근의 많은 섬들로 인해 국내에서 특히 넓은 갯벌이 형성된 곳이다(고철환 등, 2001). 이 지역은 풍부한 영양염류를 보유하는 하구갯벌로 분류되었으며 (해양수산부, 1998), 비교적 오염이 덜한 천연갯벌을 유지하고 있는 곳이다. 그러나 영종도 부근의 갯벌이 매립됨에 따라 동검도 갯벌의 퇴적물 축적이 급격히 진행되고 있다.

본 연구에 사용된 퇴적물 및 해수 시료는 2005년 12월에 강화도 동남단의 동검도에서 채취하였다. 이곳은 염하수로를 통해 유입되는 담수의 영향을 상대적으로 많이 받는 갯벌이며, 펄 90 %, 모래 10 %이하를 함유하고 있는 펄 갯벌에 속한다. 이 지역에서 직경 4 cm의 PVC 코어를 이용하여 깊이 0-10 cm에 해당하는 갯벌토양을 채취한 후 냉장상태로 실험실로 운반하였다.

2.2 퇴적물 기본 성질 분석

수분 및 유기물 함량은 오븐건조법(105° C, 24 시간)과 강열감량(600° C, 24 시간)으로 분석하였다. pH는 퇴적물과 증류수를 1: 5로 혼합하여 만든 슬러리를 원심분리(1500 rpm, 5 분)한 후, 공극수를 취하여 pH meter(420A, Orion)로 측정하였다. 염도는 퇴적물 시료 2 mL를 취하여 원심분리(1500 rpm, 5 분)한 후, 공극수를 염도계(PR-100SA, ATAGO)로 측정하였다.

2.3 1차 실험 배양 조건

1차 실험은 두 수준의 토양 깊이와 다른 염도 조건이 갯벌 퇴적물에서 발생하는 메탄량에 미치는 영향을 알아보고자 한 실험으로 각 조건에 따라 3 반복을 1 set로 총 12 개의 배양기를 만들었다. 야외에서 채취해온 시료를 질소기체로 충전된 혐기적 공간에서 0-5 cm와 5-10 cm의 두 부분으로 나누어 각각 200 mL 메스실린더에 담았다. Ses Salt를 이용하여 시료 채취시의 공극수 염도에 해당하는 인공해수와 이를 3차 증류수로 50 % 희석한 인공해수를 만들고, 이를 각각 High salt와 Low salt로 칭하였다. 퇴적물과 인공해수의 부피 비율을 1: 1.5로 하여 메스실린

더에 첨가하고, 외부와의 공기 접촉을 차단하기 위해 주입구를 실리콘과 para film으로 밀봉하였다. 15° C조건에서 배양 10 일 후 탄소원으로 1,000 mg/L 농도에 해당하는 glucose를 인공해수에 가 하였으며 총 20 일에 걸쳐 실험을 실시하였다.

2.4 2차 실험 배양 조건

2차 실험은 두 수준의 염도와 온도 조건이 갯벌 퇴적물에서 발생하는 메탄량에 미치는 영향을 알아보고자 한 실험으로 각 조건에 따라 3 반복을 1 set로 총 12 개의 배양기를 만들었다. 2차 실험에서는 5-10 cm에 해당하는 시료만 이용하여 1차 실험과 유사한 형태로 배양물을 준비하였는데, 한 가지 차이는 배양 시작과 함께 1,000 mg/L의 glucose를 가한 후 약수저를 이용하여 잘 교반해 주었다. 이 중 High salt, Low salt 각각 1 set를 15° C와 5° C의 다른 온도 조건에서 21 일에 걸쳐 배양하였다.

2.5 메탄 발생량 측정

배양기 head space에 축적된 메탄을 1차 실험은 2 일에 걸쳐, 2차 실험은 하루에 걸쳐 air-tight syringe로 채취하였다. 이를 FID detector가 장착된 GC (M600D, Younglin)를 이용해 측정하였으며 사용된 GC의 칼럼은 Porapak Q 80/100 이다.

3. 결과 및 토의

3.1 연구토양의 일반 특성

채취한 시료의 평균 수분함량은 37.4 %이고, 유기물 함량은 19.6 %로 나타났다. 동검도는 펄 90 %, 모래 10 %이하를 함유하는 펄 갯벌이고, 주변의 인공구조물 건설로 해수순환이 원활하지 못하여 퇴적물의 집적이 빠르게 일어난다(우한준과 제종길, 2002). 이 때문에 10cm 이내의 표층 퇴적물 내 해수의 유통이 원활하고, 공극율과 함수율이 높은 것으로 사료 된다(현정호 등, 2004). 또한 동검도 갯벌은 입자가 작기 때문에 간극이 좁아 표층보다 깊은 곳으로는 산소와 유기물의 침투가 어려울 뿐만이 아니라 유기물 함량이 높은 퇴적물의 집적이 빠르게 일어나기 때문에 갯벌의 혐기화가 빠르게 진행된다(현정호 등, 2004). 따라서 5-10 cm 정도의 깊이에서는 혐기적인 상태가 유지될 것으로 사료된다. 토양의 pH는 7.09로 중성의 상태를 나타냈고, 염도는 평균 25 ‰로 평균해수 염도보다는 낮은 수치를 나타냈다. 이는 동검도가 염하수로를 통해 유입되는 담수의 영향을 상대적으로 많이 받는 갯벌이기 때문으로 보인다.

3.2 메탄 발생량

갯벌의 중요한 기능 중의 하나는 오염정화기능이다. 이러한 오염정화기능을 설명하기 위해서는 갯벌의 풍부한 유기물을 분해하는 종속영양시스템을 이해할 필요가 있다(현정호 등, 2004). 갯벌의 유기물 분해는 갯벌 내에 서식하는 다양한 미생물에 의해서 주도되는데 이들의 활동은 온도와 염도, 유기물량의 변화를 통해 결정 된다(Postgate, 2003). 따라서 극단적으로 물리적인 환경변화가 나타날 경우, 미생물들에 의한 유기물 분해능은 큰 영향을 받게 된다. 특히 메탄 발생의 경우에는 주요한 조절인자가 온도, 산화환원전위, 전자수용체의 존재 여부 등이기 때문에 전 지구적인 기후 변화로 야기될 수 있는 온도의 변화, 수위의 변화, 해수 염도의 변화 등에 의해, 갯벌에서 발생하는 메탄량에 큰 변화가 있을 것으로 생각된다.

Fig. 1은 1차 실험 20 일 동안 발생하는 메탄량의 변화를 보여주고 있다. 실험초기에는 High salt의 5-10 cm 깊이 시료에서 가장 많은 메탄이 발생하였으나 10 일경에는 모든 시료에서 미량의 메탄만이 발생하였다. 이러한 차이는 메탄 발생에 필요한 갯벌 퇴적물 내의 탄소원이 배양 과정에서 소모되었기 때문일 것이라 사료되었다. 따라서 배양 10 일째에 glucose를 주입하였고, 배양 14 일부터 다시 염도 차이에 따른 메탄 발

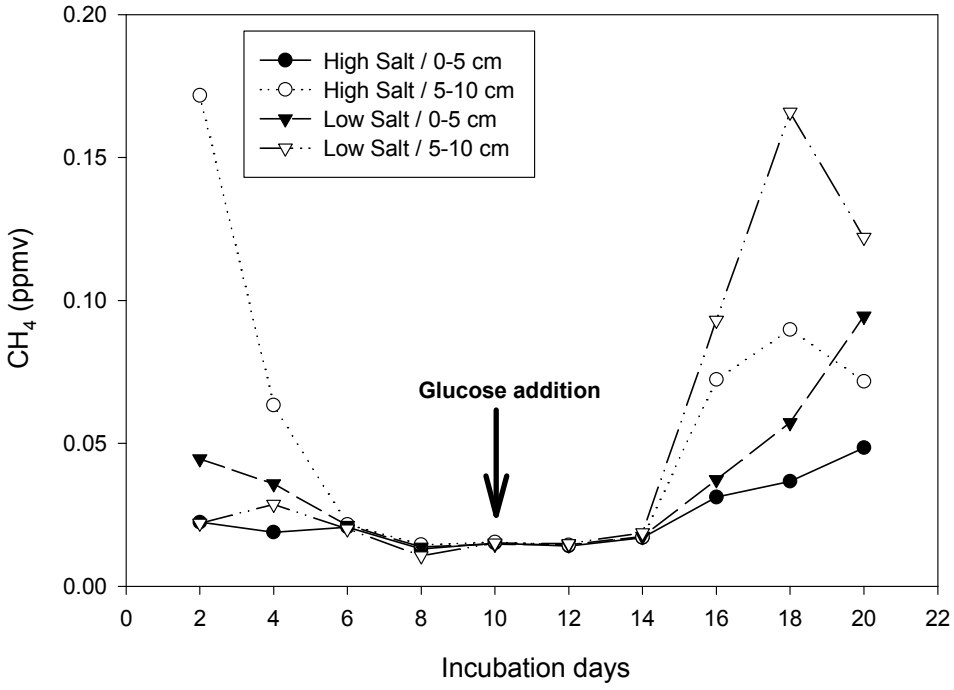

Fig. 1. Influences of salinity and depth of sediment on methane emission. 'High Salt' represents natural sea water, and 'Low Salt' represents sea water diluted to 50 % with deionized water.

생량의 뚜렷한 차이가 나타났다(Fig. 1).

먼저 두 염도 수준 모두에서 5-10 cm 깊이에서의 메탄 발생량이 0-5 cm 깊이에 비해 높게 나타났다. 메탄 발생에 관여하는 메탄생성세균은 산화환원전위가 -250 mV 이하인 매우 환원된 환경에서 활동하기 때문에 갯벌의 표면보다는 5-10 cm 깊이의 토양에서 더 많이 작용하는 것으로 생각된다.

같은 깊이의 토양끼리 비교했을 때는 두 경우 모두 염도가 낮은 경우에 더 많은 메탄을 발생시켰다(Fig 1). 일반적으로 해양 환경에서는 해수 중에서 높은 농도를 나타내는 황산염 때문에 황산염환원세균(Sulfate Reducing Bacteria: SRB)에 의한 황산염 환원이 퇴적물 내 유기물 분해의 주요부분을 차지하게 되어 메탄생성을 억제하게 된다(Capone와 Kiene, 1988). 그러나 염도가 낮아질 경우 황산염의 양이 감소하고 따라서 황산염환원세균과 경쟁관계에 있는 메탄생성세균의 활성도가 높아지기 때문에 더 많은 메탄을 발생시킬 수 있는 것으로 사료된다(Andersen 등, 2005).

온도와 염도의 영향을 살펴본 2차 실험의 결과는 Fig. 2 와 같다. 두 온도 조건과 두 염도 조건에 따라 시간이 지나면서 메탄 발생량에 차이가 나타남을 알 수 있으며, 특히 12 일경부터 이러한 경향이 뚜렷이 나타났다. 초기에는 가해진 glucose가 호기성 호흡이나 발효성 미생물에 의해 유기산으로 변화되는 과정이 진행된 것으로 추정되며 이에 따라 12일 경부터 메탄생성이 활발히 진행된 것으로 보인다.

먼저 온도 차이가 메탄 발생에 미치는 영향을 살펴보면 5° C에서 배양한 퇴적물 보다는 15° C에서 배양한 퇴적물에서 더 많은 메탄이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 메탄생성

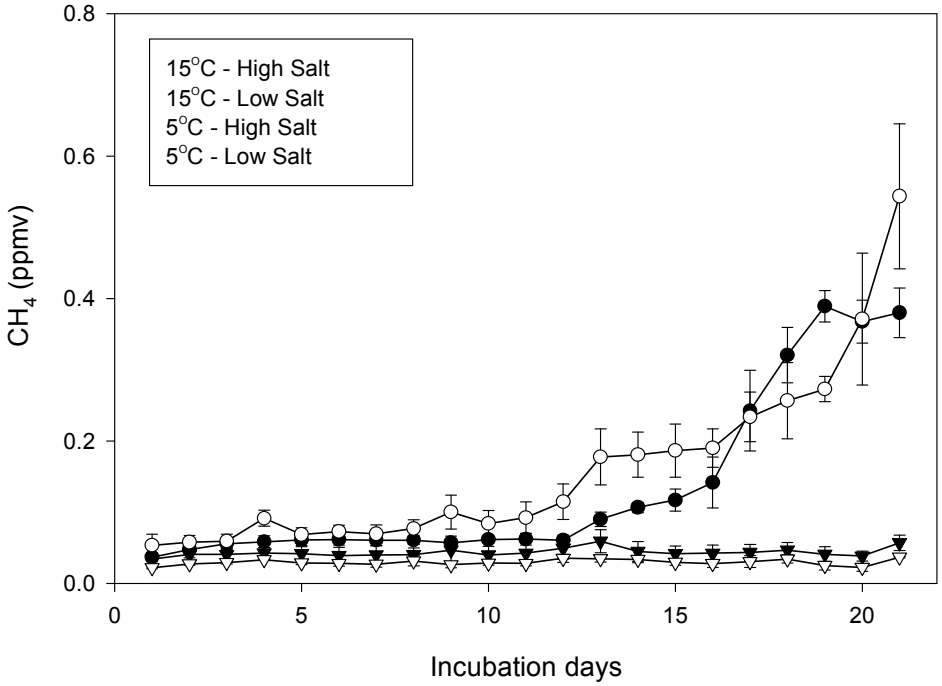

Fig. 2. Influences of salinity and temperature of sediment on methane emission. (Mean with S.E.). 'High Salt' represents natural sea water, and 'Low Salt' represents sea water diluted to 50 % with deionized water.

세균의 활성 온도와 연관이 있는 것으로 판단된다. 메탄생성세균은 *Methanobacillus sp., Methanobacterium sp., Methanosarcina sp., Methanococcus sp.* 등이 있는데, 최적 온도는 30−40° C와 50−60° C로 보고되었다(Madigan 등, 2003). 또한 야외 조건에서의 메탄의 발생도 온도와 높은 양의 상관관계를 보인다는 연구결과가 보고되었다(van Hulzen 등, 1999).

염도 차이에 의한 메탄 발생량을 살펴보면 배양 조건이 15° C일 때는 Low salt가 High salt에 비해 메탄의 발생량이 높게 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 염도가 낮아지면서 갯벌에서 주로 혐기성 미생물의 호흡에 관여하는 전자수용체(NO_3^-, MnO_2, FeOOH, SO_4^{2-})의 농도 또한 낮아짐에 따라 유기물 분해가 메탄생성 작용으로 대체되기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 5° C에서 배양한 시료에서는 이와 반대적으로 Low salt에서 메탄 발생량이 더 낮은 경향이 나타났다. 그러나 그 차이 자체가 미미하고, 시간이 지나도 발생량에 큰 차이가 거의 없는 것으로 보아 메탄생성자체가 아주 낮은 수준으로 일어나는 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 단기적인 실험을 통해 해수의 염도와 온도의 변화가 갯벌토양에서 발생하는 메탄의 양에 영향을 미칠 수 있음을 보여주었다. 이러한 연구결과는 환경변화가 갯벌토양의 메탄생성기작에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다고 할 수 있다. 실제 해양에서의 간척사업, 강수량의 변화, 해수면의 변화 등은 갯벌 토양에 공급되는 해수의 염도에 큰 영향을 줄 것이며, 지구온난화의 직접적인 효과로 해수 온도의 변화가 나타날 것으로 사료된다. 이와 같은 환경변화는 메탄이라고 하는 강력한 지구온난화 기체 발생에 심각

한 영향을 미치는 것과 동시에 상호 영향으로 인한 악순환이 반복 될 수 있음을 의미한다.

참고문헌

고철환 (2001). 황해의 환경과 물질수지 한국의 갯벌, 서울대학교 출판부

에너지경제연구원 (1995)., 기후변화협약 관련 국가보고서 작성 및 대응방안연구, 2차년도 최종보고서, 통상산업부, KEI 95-SR-31

우한준, 제종길 (2002). 강화 남부 갯벌의 퇴적환경 변화, Ocean and Polar Research, 24(4), pp. 331-343

해양수산부 (1998). 우리나라의 갯벌, 28

현정호, 목진숙, 조혜련, 조병철, 최중기 (2004). 하계 강화도 갯벌의 혐기성 유기물 분해능 및 황산염 환원력, 한국습지학회지, 6; pp. 117-132

Ainsworth, E.A. and Long, S.P. (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (FACE): A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO2, New Phytologist, 165; pp. 351-372

Alongi, D.M. (1998). Coastal ecosystem processes, CRC Press, Boca Raton, pp. 419

Andersen, M.S., Nyvang, V., Jakobsen, R. and Postma, D. (2005). Geochemical processes and solute transport at the seawater/freshwater interface of a sandy aquifer, Geochimica et Cosmochimica Acta, 69; 3979-3994

Capone, D.G. and Kiene, R.P. (1998). Microbial transformations of methylated-sulfur compounds in anoxic salt marsh sediments, Microbial Ecology, 15: 275-291

Dennison, M.S. and Berry, J.F. (1993). Wetlands guide to science, law and technology, Noyes Publications

Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M.,. van der Linden, P.J,. Dai, X, Maskell, K. and. Johnson, C.A.(eds.) (2001). Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2001: The scientific basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Kang, H.J., Freeman, C. and Ashendon, T.W. (2001). Effects of elevated CO2 on fen peat biogeochemistry, Science of the Total Environment, 279; 45-50

Madigan, M.T., Martinko, J.M., Parker, J. (2003). Brock Biology of Microorganism, Prentice Hall

Megonigal, J.P. and Schlesinger, W.H. (2002). Methane-limited methanotrophy in tidal freshwater swamps, Global Biogeochemical Cycles, 16; 1088

Postgate, J., Microbes and man (2003). Cambridge University Press

van Hulzen, J.B., Segers, R., van Bodegom, P.M,. and Leffelaar, P.A. (1999). Temperature effects on soil methane production: an explanation for observed variability, Soil Biology and Bio-chemistry, 31; 1919-1929