

# Global change ecology (Review paper)

저자: William H. SCHLESINGER (The Nicholas School of the Environment and Earth Sciences, Duke University, Durham, NC 27708, USA)

출처: 'TRENDS in Ecology and Evolution' Vol.21 No.6 June 2006

번역: pompoco78@gmail.com, 2007.1.

생태학은 유기체(organism)에 대한 전통적인 관심에서 이제는 통합된 생태계로서의 지구에 관한 연구로 확장되었다. 지구 대기에 관한 위성기술과 컴퓨터 모델들에 힘입어, 전 지구적 변동의 생태학(global change ecology)은 우리 행성의 기본적인 수치들(parameters) - 순 광합성량, 생지화학 순환, 이들에 대한 인간의 영향 - 을 기록하고 있다. 본고에서는 이러한 새로운 시야를 통해 보이는 바와 같이, 인류의 관리 하에서 지구상의 생명들이 영속가능하게 하기 위해서는 인간의 행동들이 바뀌어야 하며 그것을 위해서 무엇을 해야 하는 가에 관한 내용을 논하고자 한다.

## 서론

1970년대 초 내가 대학원생일 때, 생태학은 유기체를 다루고 있었다. 'Ecology'와 'The American Naturalist' 같은 권위 있는 학회지들은 자연계의 수많은 생물종과 그들의 재생산률, 주어진 거주지에 존속하는데 보여준 놀라운 적응력 등을 다루었다. 연구는 주로 야외에서 이루어졌다. 우리는 여름 내내 자연이 어떻게 조화를 이루는지를 연구할 목가적인 장소를 선택하곤 했다.

오늘날, 우리는 보다 넓은 시각이 굉장히 강조되고 있는 것을 알 수 있다. 생물이 지구에 끼치는 영향은 무엇인가? 지구의 지배적 종으로서 우리 인류가 다른 종의 서식지이기도 한 지구에 끼치는 영향은 무엇이고, 또 어떻게 미래의 생물들에게 영향을 끼칠 것인가? 급속하게 변하는 지구 환경에 대해 우리가 할 수 있는 것은 무엇인가? 이 모든 질문들은 전 지구적 변동의 생태학으로 종합된다. 이 학문은 지구의 과거와 현재에 초점을 맞추는 수많은 새로운 학회지들을 채우고 있다.

## 지구의 시스템적 기능에 관한 초기 연구들

이 새로운 학문의 탄생에 선구적인 역할을 한 연구자들이 있었다. 1950년대 후반, Roger Revelle는 인간이 이산화탄소 농도를 높임으로써 지구에 어떤 중요한, 하지만 알 수 없는 영향을 끼칠 '반복이 불가능한 전 지구적 실험(unreplicated global experiment)'를 하고 있

다는 언급을 한 바 있다[1]. 1960년에는 Revelle과 함께 일하던 Dave Keeling [2]이 이산화탄소의 농도가 오르고 있는 것만이 아니고 그 농도의 규칙적인 진동이 목격되며 이것이 온대지방의 육상 식물들의 광합성과 관련이 있다는 것을 밝혔다. 필자의 동료인 Dan Livingstone은 그 그래프를 보면서 '살아 움직이는 세계의 심장 박동을 내 손가락으로 느끼는 듯하다'고 말한 적도 있다[3].

1960년대 동안 Gene Odum은 개별 종에 신경을 쓰지 않으면서 광합성산물들이 인간과 같은 더 높은 영양 수준(trophic levels)으로 옮겨가거나 환경 속으로 흩어지는 전체적인 과정을 이해하려는 시도를 통해 생태계 전체의 에너지 흐름을 추적하는 방법을 선보였다[4]. Herb Bormann과 Gene Likens[5]는 칼슘, 인 등 유기체의 생화학의 필수적인 원소들을 대상으로 같은 방식으로 영양물질의 흐름을 측정하였다. 생태학자들은 IBP(국제 생물학 프로그램)의 일부분을 맡아 광합성 량과 영양물질 순환을 앞 다투어 연구하였다(IBP; [http://www7.nationalacademics.org/archives/International\\_Biological\\_Program.html](http://www7.nationalacademics.org/archives/International_Biological_Program.html) ).

Robert Whittaker[6]와 Helmut Lieth[7]가 각각 이종의(disparate) 필드 연구를 통해 지구 표면 전체의 순광합성량(net primary production)을 추산해 내는 중대한 발전을 이뤘다. 그들은 1년간 생물권이 얼마나 많은 광합성을 하는지를 처음으로 정확히 제시했다. 특기할 만한 것은, 그들이 지금으로 보면 상당히 원시적인 도구를 이용했음에도 현재 위성을 통해 측정하는 값에 근접한 값( $50\sim 60\text{PgCyr}^{-1}$ )을 산출했다는 점이다[8]. 대부분 위성에서 식물의 생산성을 측정하는 데에는 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) 공식을 사용하는데 이는 Compton Tucker와 그의 동료들이 개발한 것이고[9] 아프리카 Sahel[10]과 북부의 고위도 지방[11]의 식생활력(greenness)변화를 연구하는 데 최초로 사용되었다.

필자는 전 지구적 변동의 생태학의 시작이 1970년 Scientific American 특별 호였던 'The Biosphere'의 출간부터 라고 본다. 이 논문은 우리 지구를 광합성을 하는 유기체들이 포집한 태양에너지로 다양한 다른 생명체들이 살아가는 닫힌 생태계로 바라보았던 연구들을 통합한 최초의 시도였다. 여기 실린 일련의 논문들은 전 지구적 생지화학 순환과 그에 대한 인간의 점증하는 영향을 다뤘다. 좋은 쪽으로도, 나쁜 쪽으로도, 1974년 '성장의 한계'의 출판은 많은 사람들에게 이 유한한 행성에서 인구와 경제 둘 다의 기하급수적인 성장이 유한한 자원으로 인한 문제를 불러일으킬 것임을 깨닫게 해 주었다[12].

## 인간의 영향에 대한 전 지구적 조망

생물권에 관한 인간의 영향을 기록하기 시작한 것은 얼마 되지 않은 일이다. 1974년 Mario Molina와 Sherwood Rowland[13]이 염화불화탄소(CFCs)가 성층권의 오존을 파괴할 것을 예견했고, 이는 NASA의 위성이 오존층의 구멍을 찍은 1980년대부터 지금까지 극적으로 확인되고 있다[그림 1]. 지구전체의 염소 순환에 이런 인간에 의한 조그마한 동요가 지구, 적어도 지상에 살고 있는 생명체들의 생존에 실질적인 위협을 부과한 것이다. 지구화학자들은 질소, 인, 황, 산업에서 사용하는 중금속들 같은 인간의 물질 생산과 이동이 자연을 위협

하고 있다는 것을 입증했다[15]. 1986년에 Peter Vitousek과 그의 동료들[16]은 인간이 육지에서의 1차생산의 약 40%정도를 사용하거나 지배하고 있다고 추정했다[17, 18]. 이는 우리와 함께 살고 있는 대부분의 다른 종들의 미래에 그다지 좋은 소식은 아닐 것이다. 지구 기후의 일반화된 순환 모델과 위성사진은 Svante Arrhenius[19]가 거의 1세기 전에 예측한 것-이산화탄소 농도의 증가, 전 지구적 탄소순환 교란이 지구를 덥게 만들 것이라는 것-을 입증했고 실제로 우리는 그것을 경험하고 있다[20,21].

이런 경험적인 연구들을 이론가들이 뒷받침하고 있다. 1960년대 동안 NASA는 '달힌 계'를 관찰하는 연구 프로그램을 후원했다. 이는 NASA가 태양계의 먼 곳을 탐험하는 우주선 안에서 인간의 생존에 필요한 것이 무엇인지 그 최소한의 복잡도(minimum complexity)를 확인하고자 했던 데서 비롯되었다. 물론, 그리고 지금, 지구는 우리의 행성 우주선이다. James Lovelock[23]이 1979년에 펴낸 '가이아'는 지구위의 생물권이 유기체에 비견될 수 있으며 항상성 같이 자기 스스로의 영속을 도모하는 특질들을 가지고 있다고 주장하는 획기적인 주장을 펼쳤다. 지구의 각각의 종들은 지구에서 생명이 살게 하는 안정된 상황에 약간 썩어나마 기여하고 있는 것으로 여겨지고 있다. 비록 가이아 이론이 지금은 많은 지지를 받고 있지 않지만, 이 책의 진정한 공헌은 모든 세대의 생태학자들이 행성 생태학(planetary ecology)을 폭넓게 바라보게 만들었던 점이라고 할 수 있다.

1969년 NASA는 인류를 달에 보냈고 그곳에서 우리는 우리의 행성이 칠혹 같은 우주 속에 홀로 떠있는 것을 목격했다. 1976년 NASA는 화성까지 손을 뻗쳐 거기에 생명체가 있다는 증거가 없음을 우리에게 보여주기도 했다. 그리고 1990년대에 NASA는 자신의 기술을 지구에 적용하여 일련의 지구 관측 위성 시스템(EOS)으로 우리별을 관찰하고 온도, 광합성, 대기 화학과 토지 피복 등의 기초자료를 기록하여 지상으로 내려 보내고 있다(이 곳에서 볼 수 있다. <http://eosps0.gsfc.nasa.gov/>)[24].

(그림 1. NASA의 TOMS위성이 2005년 10월 5일에 기록한 오존 기둥의 영상. 남극 상공의 성층권에서 사상 가장 크고 깊은 오존 구멍이 관측되었다.)

## 오늘날의 위치

초기의 전 지구적 변동에 관한 과학 연구를 통해 우리는 인간이 자연에 가하는 영향에 대해 더 많이 알게 되었다. 인간이 지구의 주요한 진화력(evolutionary force)이며[25] 우리의 행동이 육지와 바다의 생태계를 지배한다는 데는 이견이 없다[26,27]. 야간의 인공조명을 담은 위성사진이 지구에 있어 인간의 넘쳐나는(pervasive) 존재감을 보여주고 있다. 지구의 모든 생태계는 화석연료 연소로부터 나오는 고농도의 이산화탄소에 둘러싸여 있다. 인간에 의해 만들어진 화학물질들은 전 대륙에서 발견되고[30] 가장 깊은 바다 속까지 급격하게 섞여 들어가고 있다[31]. 알베도(반사율-달에서 반짝이는 지구를 볼 수 있는 것처럼)마저도 대기 중의 에어로졸과 구름에 짐을 지운 결과를 보여주는 증가추세이다[32].

우리가 대학원생일 때 다니던 원래의 연구지역들은 인간에 의해 관리되고 급격하게 개발되

는 지금의 지구 표면과는 너무나 거리가 멀다. 30여 년 전 우리가 그렇게 열심히 공부했던 유기체들에게 중요한 것은 이제 그들이 자연의 상태(Nature's stage)에 대해 어떻게 행하는가가 아니고 이 상태(stage)가 그 유기체들 전부에게 생존의 터전으로 남게 될 것인지 여부이다. (What matters most for the organisms that we studied so diligently 30 years ago is not so much how they perform on Nature's state, but whether the stage will exist for them at all.)

## 지구 변화 과학의 주안점: 바다

앞으로 연구해야 할 것들은 많지만, 특히 지표면의 70%에 달하는 바다가 연구되어야 한다. 현재 대양의 순광합성량에 대해서는 상당히 정확한 추정치가 있지만[33], 대양에서의 광합성의 원료인 질소, 인, 철, 규소 등에 대해서는 잘 알고 있지 못하다. 대양에서의 질소의 원천과 혐기성 암모니아 산화 박테리아를 통한 그것의 손실을 연구한 새로운 결과로 인해 우리가 바다에서의 질소 순환에 대해 알고 있던 사실들은 최근에 새롭게 정리되었다[34]. 대기 중 이산화탄소 농도의 증가가 이미 대양의 pH를 0.1 정도 낮췄고 이번 세기 동안 점점 더 산성화가 심해질 것이라는 연구 결과도 있다[35]. 기후변화가 대양의 온도를 높이고 전 지역에 걸쳐 염도를 낮췄다는 것도 보고되었다[36,37]. 또한 우리는 풍화에 의해 바다에 유입되는 토양을 오염시킴으로써 바다의 순광합성량을 변화시키기에 이르렀다[38].

이 모든 것들이 우리가 바다를 과다하게 착취하고 있다는 증거들이다. 거의 8%에 달하는 대양의 광합성량이 현재의 어획에 의해 소모되고 있다[39]. 대양이 모든 산업화된 사회의 오염물질을 희석시키는 무한한 개수대가 아니라는 것도 점점 분명해 지고 있다; 우리는 아직 수은, 폴리브롬화 유기화합물 등 물고기들을 먹을 수 없게 만드는 오염물질들의 원천에 대해 잘 알고 있지 못하다. 우리는 지구의 마지막 남은 거대한 지역을 오염시킬 것인가? 아니면 이런 몇 가지 화합물들을 정화시킬 것인가[40-42]?

## 종은 중요한가(Do species matter)?

NASA가 처음 제기했던 물음은 오늘날 오히려 더 의미심장해 지고 있다: 지속가능하게 지구가 작동하려면 얼마나 많은 생물들이 자연 상태 그대로 남아있어야 하는가? 생물종다양성 보존에 있어 윤리나 미학을 잠시 접어두고, 우리는 생태계를 얼마나 단순하게 만들 수 있을 것인가? 농경, 화전, 비료, 해충 구제와 같은 대규모의 인위적인 인간의 개입 없이 잘 작동할 것인가? (how simple can we make an ecosystem, while still seeing it function well without massive, artificial human interventions, such as cultivation, irrigation, fertilization and pest control?). David Tilman 등[43]이 연구한 바에 따르면 종 구성양태가 악화되는 지역의 초지 생태계는 (보통보다) 더 많은 질소 손실을 보여준다고 한다. 이에 따르면 종 다양성이 높은 곳에서는 생태계 기능도 건강하다고 할 수 있다. 종다양성이 안정성을 낳을 것인가? 아니면 풍부(redundancy)하여 눈에 보기엔 좋지만 전체 지구의 지속가

능성에는 별 의미를 가지지 못하는가?

새로운 질문도 제기되었다. 진화의 원천(raw)물질인 자연적인 유전적 다양성을 희생하면서 우리에게 새로운 인공적인 '종'을 만들어낼 수 있게 해준 유전자조작생명체(GMO)의 영향은 어떤 것인가? 목적의식적으로건 부주의에 의해서건, 지구상의 식물이나 동물을 급속하게 단일종화(homogenize)하고 자주 여행을 다니며 상업과 문화를 세계화하는 무역 등에 관한 우리의 노력으로 부터 어떤 미래를 예상할 수 있는가? 질병의 전 지구적 확산에 우리는 어떻게 대응할 것인가?

우리가 지구의 기후와 화학적 성질의 변화에 대해 예상하고 적응했던 것처럼, 우리는 대규모, 장기간의 실험을 해야 이산화탄소, 질소, 오존의 증가와 온도와 강우량의 변화에 생물상(biota)이 대응하는 방식을 이해할 수 있다. 이산화탄소 강화 자유 공기(Free Air CO2 Enrichment; FACE)를 이용해서 숲속에서 한 실험, 철을 해수에 넣는 실험[45], 방사성질소(15N)를 개울에 풀어보는 실험[46]등은 전체적으로 생태계가 인간의 교란에 어떻게 대응하는지를 해명하는 데 큰 도움이 되었다. 다음 작업은 다중의 압박에 자연이 어떻게 대응하는지를 이해할 수 있도록 계승적인(factorial) 실험을 하는 것이 되어야 할 것이다.

다행스럽게도, 우리는 우리의 연구를 더 잘할 수 있게 하는 새롭고 멋진 도구들을 가지고 있다. 분자기술은 지구의 생지화학 순환 대부분을 관장하고 있는 미생물 군집(communities)을 더 잘 들여다보고 이해할 수 있게 해줄 것이다. 예를 들어, 분자 분류학(molecular systematics)은 바다 속에서 NH4를 N2로 바꾸는 혐기성 암모늄 산화(anammox)반응의 촉매가 되는 박테리아를 식별하는 데 사용되었다[47]. 질량 분석법(mass spectrometry)은 다른 풀(pools)과 유동(fluxes)에서 안정적인 동위원소의 비율을 분석하는 데 쓰였고, 지구의 화학적 성질을 통제하는 데 있어 생물학적 중요성을 이해하는 방식을 혁명적으로 바꿔놓았다. Eddy 공분산 방법론을 통해 우리는 지표면의 광대한 지역에서 순 탄소 변화량을 측정할 수 있게 되었다(e.g. [48]). 그리고 원격탐사 기술로 인해 생태계의 기능을 더 자주 그리고 더 세밀하게 관찰할 수 있는데 이는 예전에는 불가능했던 일이다. 이런 관측치 들은 우리가 지표면의 기작과 기후의 변화, 기후 변화 요인들(climatic forcings)을 효과적으로 결합시켜 생각할 수 있도록 할 지구의 시스템적 기능을 모형화 하는 데 매우 중요하다. 다행히도, 매일매일, 모든 자료를 합쳐서 분석할 수 있도록 우리의 컴퓨터 기술도 날로 발전하고 있다.

## (사람들이) 믿고 있는 것들과 정치(Beliefs and Politics)

지구의 어떤 곳에서는 정책 생산자들과 정치가들이 인간의 부주의한 관리 하에 놓여있는 지구에 어떤 일들이 벌어질 것인지를 밝히는 과학 연구에 깊은 관심을 보이고 있다. 그러나 저개발 국가들 대부분에서 지역주민들은 당장 먹고 사는 데 필요한 충분한 식량과 깨끗한 식수를 어떻게 조달할 것인가 하는 문제에 직면한 채 혼란에 빠져 있다. 슬픈 일이지만, 다른 지역에서는 관심이 깊지 않다. 도움을 줄 수 있는 많은 사람들은 인구 폭발과 자원 사용량 증가로 인한 좁은 길(bottleneck)을 어떤 신이 내리는 간섭 같은 것이 우리를 인도함으로서 지날 수 있을 것이라 믿는다[49]. 그들은 개인적 희생을 원하지 않는다. 아마도 우리

가 초기의 생태학 연구로부터 배운 가장 중요한 점은 인간의 행동이 다른 유기체들의 행동에서 크게 동떨어지지 않았을 것이란 점일 것이다. 새장 속의 다람쥐 한 마리 한 마리는 내 일을 단지 또 다른 날이라 생각하며 살아간다(Each squirrel on my birds tray feeds as if tomorrow is simply another day).

많은 지구 변동 과학자들은 '지속가능성'의 과학에 대해 얘기한다. 실제로, '지속가능한 개발'이라는 문구의 의미를 놓고 뜨거운 논쟁이 벌어지고 있다. 산업화 이전 시대에는 인간은 자연과 조화를 이루며 살아왔다. 그것은 의심할 여지없이 힘든 삶이었지만, 몇 세기에 걸쳐 유지되었다. 지금 우리가 맞닥뜨린 문제는 우리가 오늘날 원하는 생활을 영위하면서 그 삶을 내일도 살아갈 수 있도록 우리의 삶을 지탱하는 지구의 시스템을 악화시키지 않는 것이다. 그리고 우리는 단순히 수십 년 전에 우리가 그렇게 열심히 연구했던 종들을 보존하기 위해서라도 최선의 노력을 기울여야 한다. 전 지구적 변동의 과학은 큰 과제를 떠안고 있지만 우리가 그 과제를 수행할 시간은 조금 밖에 남지 않았다.

## 참고문헌

- 1 Revelle, R. and Suess, H.E. (1957) Carbon dioxide exchange between the atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> during the past decades. *Tellus* 9, 18-27
- 2 Keeling, C.D. (1960) The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus* 12, 200-203
- 3 Livingstone, D.A. (1973) Summary and envoi. In *Carbon and the Biosphere* (Woodwell, G.M. and Pecan, E.V., eds), pp. 366-368, National Technical Information Service
- 4 Odum, E.P. (1968) Energy flow in ecosystems: a historical review. *Am. Zool.* 8, 11-18
- 5 Bormann, F.H. and Likens, G.E. (1967) Nutrient cycling. *Science* 155, 424-429
- 6 Whittaker, R.H. (1970) *Communities and Ecosystems*, MacMillan
- 7 Lieth, H. (1975) Modeling the primary productivity of the world. In *Primary Productivity of the Biosphere* (Lieth, H. and Whittaker, R.H., eds), pp. 237-263, Springer
- 8 Field, C.B. et al. (1998) Primary productivity of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science* 281, 237-240
- 9 Tucker, C.J. and Sellers, P.J. (1986) Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Remote Sens.* 7, 1395-1416
- 10 Tucker, C.J. et al. (1990) Expansion and contraction of the Sahara desert from 1980 to 1990. *Science* 253, 299-301
- 11 Myneni, R.B. et al. (1997) Increased plant growth in northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386, 698-702
- 12 Meadows, D.H. et al. (1974) *The Limits to Growth*, Universe Books
- 13 Molina, M.J. and Rowland, F.S. (1974) Stratospheric sink for chlorofluoromethanes:

chlorine atom-catalyzed destruction of ozone. *Nature* 249, 810–812

14 Graedel, T.E. and Keene, W.C. (1995) Tropospheric budget of reactive chlorine. *Global Biogeochem. Cycles* 9, 47–77

15 Bertine, K.K. and Goldberg, E.D. (1971) Fossil fuel combustion and the major sedimentary cycle. *Science* 173, 233–235

16 Vitousek, P.M. et al. (1986) Human appropriation of the products of photosynthesis. *Bioscience* 36, 368–373

17 Rojstaczer, S. et al. (2001) Human appropriation of photosynthesis products. *Science* 294, 2549–2552

18 Imhoff, M.L. et al. (2004) Global patterns in human consumption of net primary production. *Nature* 429, 870–872

19 Arrhenius, S. (1896) On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Lond. Edin. Dub. Philos. Mag. J. Sci.* 41, 237–276

20 Harries, J.E. et al. (2001) Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997. *Nature* 410, 355–357

21 Hansen, J. et al. (2005) Earth's energy imbalance: confirmation and implications. *Science* 308, 1431–1435

22 Taub, F.B. (1974) Closed ecological systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 5, 139–160

23 Lovelock, J.E. (1979) *Gaia*, Oxford University Press

24 Running, S.W. et al. (2004) A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience* 54, 547–560

25 Palumbi, S.R. (2001) Humans as the world's greatest evolutionary force. *Science* 293, 1786–1790

26 Foley, J.A. et al. (2005) Global consequences of land use. *Science* 309, 570–574

27 Vitousek, P.M. et al. (1997) Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277, 494–499

28 Elvidge, C.D. et al. (1997) Satellite inventory of human settlements using nocturnal radiation emissions: a contribution for the global toolchest. *Glob. Change Biol.* 3, 387–395

29 Sanderson, E.W. et al. (2002) The human footprint and the last of the wild. *Bioscience* 52, 891–904

30 Simonich, S.L. and Hites, R.A. (1995) Global distribution of persistent organochlorine compounds. *Science* 269, 1851–1854

31 Krysell, M. and Wallace, D.W.R. (1988) Arctic ocean ventilation studied with a suite of anthropogenic halocarbon tracers. *Science* 242, 746–749

32 Palle, E. et al. (2004) Changes in Earth's reflectance over the past two decades. *Science* 304, 1299–1301

33 Behrenfeld, M.J. and Falkowski, P.G. (1997) Photosynthetic rates derived from

- satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* 42, 1–20
- 34 Arrigo, K.R. (2005) Marine microorganisms and global nutrient cycles. *Nature* 437, 349–355
- 35 Orr, J.C. et al. (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, 681–686
- 36 Dickson, B. et al. (2002) Rapid freshening of the deep North Atlantic Ocean over the past four decades. *Nature* 416, 832–837
- 37 Levitus, S. et al. (2000) Warming of the world ocean. *Science* 287, 2225–2229
- 38 Jickells, T.D. et al. (2005) Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science* 308, 67–71
- 39 Pauly, D. and Christensen, V. (1995) Primary production required to sustain global fisheries. *Nature* 374, 255–257
- 40 Mason, R.P. et al. (1994) The biogeochemical cycling of elemental mercury: anthropogenic influences. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58, 3191–3198
- 41 Monteiro, L.R. and Furness, R.W. (1997) Accelerated increase in mercury contamination in North Atlantic mesopelagic food chains as indicated by time series of seabird feathers. *Environ. Toxicol. Chem.* 16, 2489–2493
- 42 Teuten, E.L. et al. (2005) Two abundant bioaccumulated halogenated compounds are natural products. *Science* 307, 917–920
- 43 Tilman, D. et al. (1996) Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature* 379, 718–720
- 44 Norby, R.J. et al. (2005) Forest response to elevated CO<sub>2</sub> is conserved across a broad range of productivity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 102, 18052–18056
- 45 Coale, K.H. et al. (2004) Southern ocean iron enrichment experiment: carbon cycling in high- and low-Si waters. *Science* 304, 408–414
- 46 Mulholland, P.J. et al. (2004) Stream denitrification and total nitrate uptake rates measured using a field <sup>15</sup>N tracer addition approach. *Limnol. Oceanogr.* 49, 809–820
- 47 Kuypers, M.M.M. et al. (2003) Anaerobic ammonium oxidation by anammox bacteria in the Black Sea. *Nature* 422, 608–611
- 48 Ciais, P. et al. (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437, 529–533
- 49 Wackernagel, N. et al. (2002) Tracking the ecological overshoot of the human economy. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 99, 9266–9271