

## Sr-Nd 동위원소를 이용한 국내 퇴적황사의 발원지 규명: 2007년 봄철 황사

염승준\* · 이평구

한국지질자원연구원

### Source Identification for Asian Dust Deposited on Domestic Area Using Sr-Nd Isotope Ratios in Spring, 2007

Seung-Jun Youm\* and Pyeong-Koo Lee

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

Recently, the occurrence and intensity of Asian Dust have dramatically increased in Korean peninsula, resulting in severe damages to the domestic social and economic field. The most useful way to prevent the damage of Asian Dust is the restraint of the occurrence of Asian Dust itself. However, Asian dust is the one of the natural phenomena, thus there is a basic limit to manage the Asian Dust. Though it is impossible to restrain the occurrence of Asian Dust in short time at present, it is a urgent matter to minimize the damage of Asian Dust. It is necessary to construct the basic data for understanding the harmfulness of Asian Dust, and to elucidate the source area of Asian Dust in connection with the maleficence of itself. In this study, the source area of Asian Dust in spring, 2007, is investigated using the Sr-Nd isotopic ratios which is the most common method to trace the source of geological materials. The relationships of Sr-Nd isotope ratios indicate that Asian Dust was originated from Central Loess Plateau and/or Ordos desert in spring, 2007.

**Key words :** Asian Dust, source area, domestic sediment of Asian Dust, strontium, neodymium

최근 국내의 황사 발생일수 및 강도가 급증하고 있으며, 사회경제적으로 황사에 의한 유형적 및 무형적 피해의 규모 및 정도가 심각한 실정이다. 현재 황사 발원지에서 사막화방지를 위한 조림/녹화사업이 국가차원은 물론 민간차원에서도 활발히 진행되고 있으나, 사막지역의 광대함, 발원지의 기후 및 토양 조건, 그리고 현지 원주민의 경제적 낙후성 등으로 인하여, 단기간 내에 그 목적을 달성하기가 어려운 실정이다. 따라서 현재 국내에서 발생하는 황사에 의한 피해를 최소화하는 것이 중요하다. 황사피해에 대처하기 위해서는 우선 황사의 발원지에 따른 황사의 유해성을 파악하고, 황사 발원지 중 어느 지역으로부터 발원하는 황사가 우리나라에 피해를 주는 지에 대한 과학적인 자료가 필요하다. 이번 연구에서는 지질물질의 기원을 추적하는 데에 많이 이용되고 있는 Sr-Nd 동위원소 조성비를 이용하여 2007년 봄철에 우리나라에 발생하였던 황사의 발원지를 규명하였다. 황사 발원지 토양 및 국내에서 발생한 퇴적황사의 Sr-Nd 동위원소 조성비의 분석결과, 황사 발원지는 황토고원일 가능성이 매우 높게 나타났으며, 오도스 사막 또한 가능성이 있는 것으로 판단된다.

**주요어 :** 황사, 발원지, 국내퇴적황사, 스트론튬, 네오디미움

### 1. 서 론

2000년 이후로 황사현상이 급격히 증가하고 있다 (Chun *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2002; Gao *et al.*,

2003; Kurosaki and Mikami, 2003). 국내에서는 7-8월을 제외한 모든 시기에 황사 현상이 발생하고 있으며, 특히 봄(3-4월)에 많이 발생하고 있다(KMA homepage). 중국과 몽골에는 타클라마칸, 고비, 오도스

\*Corresponding author: sjyoum@kigam.re.kr

사막 및 황토고원 등 건조지대가 분포하고 있으며, 이들 지역으로부터 불어오는 황사(미세먼지)는 오랜 지질 시대를 거쳐 북반구의 기후, 인간의 건강 및 생물 활동에 영향을 미치고 있다(Duce, 1995; Chadwick *et al.*, 1999; Wilkening *et al.*, 2000). 이들 건조 지역은 자연적인 작용과 인간 활동의 결과로 인하여 사막화가 점점 더 가속화되고 있으며, 점점 더 북쪽 및 동쪽으로 확대되고 있다(Sheehy, 1992; Zhu *et al.*, 1992; Zhang *et al.*, 2001; KMA homepage). 모델링 연구와 기후학적 연구(Sun *et al.*, 2000; Husar *et al.*, 2001; Xuan and Sololik, 2002; Chung *et al.*, 2003)에도 불구하고, 주요 황사 발생시에 퇴적황사의 기원을 규명하는 것은 매우 어려운데, 그것은 이러한 황사 발원지에 대한 지구화학적 자료가 부족하기 때문이다. 이에 대한 연구는 황사로부터 발생할 수 있는 환경적 평가를 정확히 수행하여, 대책을 마련하는 데 있어 중요하다(Nakano *et al.*, 2004).

암석 및 광물은 지질학적 기원에 따라 특징적인  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  및  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  비율을 갖고, 대기에서 이동 중 또는 지표에 퇴적된 이후에도 원소 조성에 비해 훨씬 덜 변하기 때문에 Sr-Nd 동위원소 조성비는 지각물질의 기원(발원지)을 규명하는 데 있어서 좋은 지시자로 사용될 수 있다(Biscaye *et al.*, 1997; Asahara, 1999; Chadwick *et al.*, 1999; Bory *et al.*, 2002; Grousset *et al.*, 2003).

Nakano *et al.*(2004)은 중국 북부의 사막 토양 및 황토 등 건조지대의 토양이 Sr-Nd 동위원소 조성비를 이용하여 구분될 수 있음을 보고하였다. 이러한 결과로부터 현재 황사에 의해 베이징에 퇴적되는 미세먼지가 베이징에서 멀리 떨어져 있는 타클라마칸 사막 및 고비 사막의 남서부 또는 황토고원 보다는 베이징의 북서부와 서부에 인접하여 있는 건조지역에서 기원하였으며, 이는 이들 인접 지역의 사막화작용과 관계가 있을 것이라고 제시하였다. 또한 건조지역 토양의 Sr-Nd 동위원소 조성비는 미세먼지의 기원과 그에 의한 영향 평가에 유용한 방법이며, 사막화작용의 지표(index)로서 이용될 수 있음을 보고하였다.

한편 Yokoo *et al.*(2004)은 중국 황토고원(Central Loess Plateau)의 황토 및 사막 토양을 대상으로 광물의 조성(연속추출을 통하여 구분한 황토 및 사막 모래의 fractions) 별 Sr-Nd 동위원소 조성비 및 화학성분의 변화를 이용하여, 북서 태평양(중국 황하, 한국, 일본 및 북태평양 지역 등) 지역에서 발생하는 건식 및 습식 퇴적물의 기원을 추적하는 지시자로서의 활용 가

능성을 제시하였다.

Wang *et al.*(2007)은 중국 황토고원에서 심도에 따른 지층(Red Clays 및 상부의 loess-paleosols) 별 산-불용성 잔류물(acid-insoluble residue)의 Sr-Nd 동위원소 조성비의 변화를 이용하여, 황토고원의 심도별 퇴적물의 기원이 같음을 밝혔으며, Nd 동위원소 조성비는 거의 일정한데 비해 Sr 동위원소 조성비가 변화하는 것은 계절에 따른 몬순의 영향으로 황토고원을 구성하는 심도별 지층 내 풍성층 입자의 크기가 시기에 따라 다르기 때문임을 규명하였다.

이전에는 우리나라에서 발생하는 황사의 발원지로서 타클라마칸, 고비사막 및 황토고원 등을 고려하였으나, 최근에는 이들 지역보다 우리나라와 지리적으로 가까운 만주 지역 등도 주요한 황사발원지로 생각하고 있다(Chun *et al.*, 2003). 하지만 이러한 퇴적황사의 기원을 정량적으로 규명할 수 있는 자료는 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 중국의 황토고원과 타클라마칸, 오도스 사막 등 발원지 토양과 국내에서 발생한 황사(미세먼지)의 Sr-Nd 동위원소 조성비를 이용하여, 2007년 봄철에 발생한 황사의 기원(발원지)을 규명하고자 한다.

## 2. 중국 내 주요 사막 분포

건조지역은 강수량, 사구 이동/파괴 등에 따라 크게 사막(Desert)과 사지(Sandy Land)로 구분된다. 중국 내 주요 사막 및 사지는 다음과 같다(Fig. 1). 타클라마칸(Taklimakan) 사막은 중국에서 가장 대표적인 사막으로, 중국의 서쪽에 위치하고 가장 넓은 면적으로 분포하고 있다. 타클라마칸 사막의 북쪽에는 황토로 이루어진 일리(Yili) 분지가 분포하며, 북동쪽인 우루무치 부근에는 구얼반통구터(Gurbantunggut) 사막이, 남동쪽인 돈황 부근에는 차이담(Qaidam) 사막이 분포하고 있다. 한편 몽골과의 경계 지역인 중국 북부에는 바단지린(Badain Jaran), 텅거리(Tengger), 쿠부치(Hobq), 마오우쑤(Mu Us) 사막 등이 분포하고 있다. 이들 중 바단지린과 텅거리 사막은 알라산 고원(Alashan Plateau)에, 쿠부치 및 마오우쑤 사막은 오도스 고원(Ordos Plateau)에 위치하고 있다. 한편 오도스 사막의 남쪽에는 우리가 잘 알고 있는 황토고원(Central Loess Plateau)이 위치하고 있다. 한편 동쪽에는 훈산다크(Onqin Daga) 사지가 분포하고 있으며, 만주지역에는 커얼친(Horqin) 사지가 분포하는 데, 커얼친 사지는 우리나라와 가장 가까운 거리(약 500 km)에 위치한

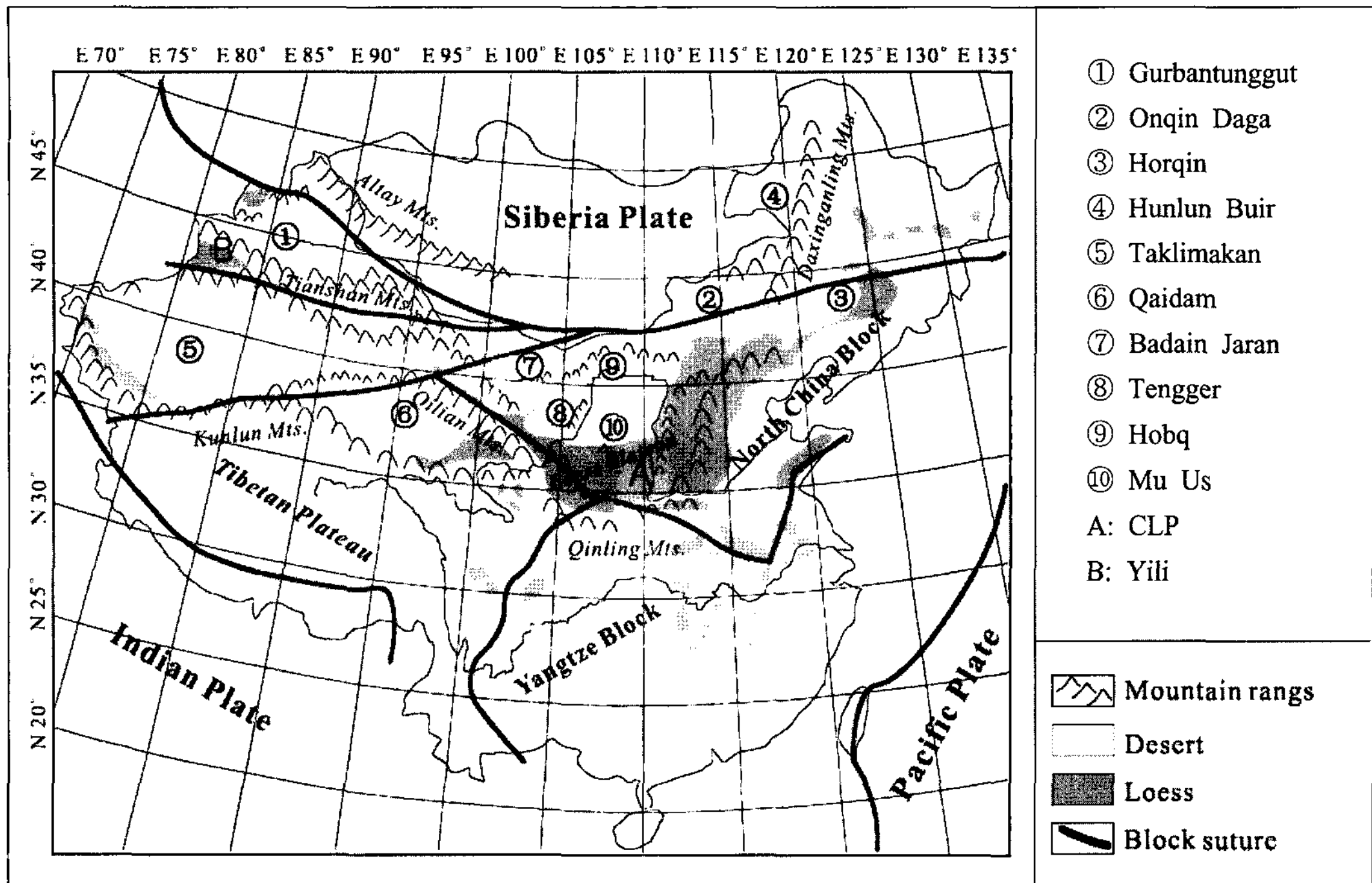


Fig. 1. The distribution map of Chinese deserts, landy sands and loess areas(modified after Chen *et al.*, 2007).

다. 더 북쪽에는 후룬베이얼(Hunlun Buir) 사지가 분포하고 있다(Chen *et al.*, 2007; Kanayama *et al.*, 2002).

### 3. 시료채취 및 화학분석

#### 3.1. 시료채취

미세먼지 채취는 주변 토양 및 가능한 오염물질(차량, 도로변 퇴적물 등)의 유입을 방지하기 위하여 한국 지질자원연구원 제2연구동(3층 건물)의 옥상에서 2007년 2월 27일부터 4월 27일까지 실시하였다. 시료의 채취는 크게 대기 중의 미세먼지 및 대기 중의 미세먼지가 자연적으로 침강하여 지표면에 쌓이는 풍성퇴적물로 구분하여 수행하였다. 이번 연구에서 채취한 미세먼지는 다음과 같이 4개로 구분하였으며, 그 명칭은 임의적으로 정한 것이다.

- (1) 황사부유물(Aerosols<sup>1</sup>): 기상청에서 황사를 발령한 시기에 공기채집기를 이용하여 채취한 대기 중 미세먼지.
- (2) 퇴적황사(Asian Dust<sup>1</sup>): 기상청에서 황사를 발령한 시기에 tray를 이용하여 채취한 미세먼지
- (3) 대기부유물(Aerosols<sup>2</sup>): 기상청에서 황사를 발령하지 않은 시기에 공기채집기를 이용하여 채취한

대기 중 미세먼지

- (4) 건조퇴적물(Asian Dust<sup>2</sup>): 기상청에서 황사를 발령하지 않은 시기에 tray를 이용하여 채취한 미세먼지

연구기간 중 기상청에서 대전지역의 황사발생일로 발표한 3월 6일(F4), 3월 27일(F13), 3월 28일(F14), 3월 31일-4월2일(sd-1) 중에서 연구지역(한국지질자원연구원)에서 측정된 PM<sub>10</sub> 질량농도가 200 µg/m<sup>3</sup> 이상을 나타낸 황사기간은 3월 31일-4월 2일(sd-1)과 3월 28(F14)일의 2번이며, 3월 6일(F4)과 3월 27일(F13)에는 PM<sub>10</sub> 질량농도가 200 µg/m<sup>3</sup> 이하로서 본 논문에서는 비황사기간의 대기부유물로 분류하였다.

대기 중의 황사부유물 및 대기부유물은 일본 시바타(SIBATA)사의 대용량 공기채집기(High Volume Air Sampler)를 이용하여 TSP(Total suspended particle; 총부유분진)를 채취하였다. 사용한 필터는 Quartz fiber filter(QR-100, 12"×20")이며, 유량은 1000 L/min이다. 퇴적황사 및 건조퇴적물은 건물 옥상 바닥에 약 200개의 tray(알루미늄 쟁반)를 설치하여 채취하였다. 이때 옥상 바닥을 깨끗이 청소한 후, 바닥에 비닐을 깔아서 주변으로부터의 오염을 최소화하였다.

시료의 채취 시간은 아침 9시부터 다음날 9시까지 24시간 동안 채취하는 것을 기준으로 하였으며, 우기

시에에는 채취를 중단하였다. 한편, 퇴적황사 및 건조퇴적물의 경우에는, 가능한 한 많은 양의 시료를 확보하기 위하여, 최대 4일까지의 시료를 합쳐서 채취하였으며, 이 또한 우기 시에는 채취를 중단하였다. 국내에서 채취한 미세먼지 중에서 Sr 동위원소 분석은 퇴적황사, 황사부유물, 대기부유물, 건조퇴적물 모두를 대상으로 하였으며, Nd 동위원소 분석은 퇴적황사와 건조퇴적물만을 대상으로 수행하였다.

### 3.2. 전처리 및 화학분석

Sr-Nd 동위원소 조성비의 전처리 및 분석방법은 다음과 같다. 테플론 용기에 대상 시료 약 50 mg과 혼합산(HF+HClO<sub>4</sub>(10:1)) 3 ml과 HNO<sub>3</sub> 2 ml을 넣고 핫플레이트(120)에서 24시간 동안 용해시켰다. 원소분리를 위한 컬럼화학은 2.5N HCl을 사용하여 양이온수지(Dowex AG50W-X8, #200-400, H<sup>+</sup> form resin)에서 Sr과 Nd를 포함한 REE 분리한 후, Sr은 Ta 필라멘트에 1M의 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>와 함께 엮어 분석하였다. Nd의 분리는 0.25N HCl으로 2-ethylhexyl phosphoric acid (HDEHP)로 코팅된 테플론 분말을 사용하였으며, 0.1M H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>와 함께 Re 필라멘트에 엮었다. Sr-Nd 동위원소 조성비는 한국기초과학지원연구원의 열이온화 질량분석기(TIMMS; VG54-30)를 이용하여 분석하였다. Sr 동위원소 측정은 dynamic mode 에서 수행되었다. Sr 동위원소 조성비(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)는 <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr=0.1194를 이용하여 보정하였다. Sr 표준시료인 NBS987(0.710248)에 대한 중복 분석 결과, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.710249±0.000004 (n=30, 2s SE)으로 나타났다. Nd 표준시료인 La Jolla (0.511859)에 대한 중복 분석결과, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.511830±0.000006(n=30, 2s SE)으로 나타났다.

Sr 함량은 한국기초과학지원연구원 대덕본원에서 ICP-AES(OPTIMA 4300DV, PerkinElmer)를 이용하여 분석하였다. 발원지 및 국내 토양 1.0gr, 국내 퇴적황사 및 건조퇴적물 0.5gr. 및 석영필터 1/8(즉, 황사부유물 및 대기부유물)을 각각 테플론 비이커에 넣고 HF 10 ml와 HClO<sub>4</sub> 2 ml를 넣어 110°C에서 증발시킨 후, 다시 HF 10 ml와 HClO<sub>4</sub> 1 ml를 넣고 110°C에서 완전하게 증발시킨다. 다시 한번 HClO<sub>4</sub> 1 ml를 넣은 후 110°C에서 흰연기가 발생하지 않을 때까지 가열한다. 이후 12N HCl 5 ml를 넣어 잔류물을 용해시킨 후 탈이온수 20 ml를 넣고 0.45 μm 필터로 여과하여 기기분석을 수행하였다.

한편 석영 필터를 이용하여 채집한 황사부유물 및 대기부유물은 석영필터를 포함한 시료 전체를 용해하

였기 때문에, 미세먼지 내 원소뿐만 아니라 석영 필터 내 원소도 포함되어 있다. 따라서 석영 필터에 의한 영향을 보정하기 위하여, 석영 필터 공여지(blank filter)의 Sr 동위원소 조성비(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.7117) 및 함량(0.86 ppm)을 분석하여 황사부유물과 대기부유물의 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소 조성비 및 함량을 보정하였다. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소 조성비의 보정 방법은 다음과 같다.

$$({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{ad}} = \{ \{ ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{mes}} \times (\text{Sr})_{\text{mes}} \} - \{ ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{filter}} \times (\text{Sr})_{\text{filter}} \} \} / (\text{Sr})_{\text{ad}}$$

여기서 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)와 (Sr)는 각각 Sr 동위원소 조성비 및 농도이며, ad, mes 및 filter는 각각 미세먼지, 분석값 및 공여지(blank filter)이다.

## 4. 연구결과

### 4.1. Sr 동위원소 분석결과

발원지 토양, 국내 퇴적황사 및 토양에 대한 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소 조성비 분석 결과는 Table 1과 같다. 또한 이번 연구에서 분석한 결과와 비교하기 위하여 기존에 발표된 발원지 토양의 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소 조성비도 함께 기재하였다(Table 2).

기존에 발표된 황사 발원지에 대한 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소 조성비는 다음과 같다. 황토고원은 0.71404-0.71812의 범위를 보이며, 평균 조성비는 0.71562(n=13)를 나타내고 있다. 타클라마칸 사막은 0.71229-0.71592의 범위이며, 평균값은 0.71409(n=8)이다. 타클라마칸 사막의 북부에 위치하는 Yili basin의 Loess는 0.71252-0.71668(평균 0.71395(n=4))의 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소 조성비를 보여준다. 알라산 고원에 위치하는 바단지린과 텅거리 사막의 모래는 각각 0.71521-0.71657(평균 0.71589(n=2)) 및 0.71418-0.72045(평균 0.71642(n=3))의 범위를 보이고 있다. 오도스 사막의 모래에 대한 기존 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소 조성비는 0.71479이다. 한편 구얼반통구터 사막의 경우에는 최소 0.70921에서 최대 0.71385(평균 0.71048(n=6)) 범위의 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소 조성비를 나타내고 있다. 쿠부치 및 차이담 사막은 각각 0.71293 및 0.71489의 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소 조성비를 보여주고 있다.

이번 연구에서 수행한 발원지 토양, 국내 퇴적황사 및 토양의 분석결과는 다음과 같다(Table 1). 황토고원 시료의 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소 조성비는 최소 0.71268에서 최대 0.71586이며 평균값은 0.71448(n=10)이다. 기존 발표 자료에 비해 이번에 분석된 황토고원 시료의 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소의 평균 조성비가 낮게 나타났으나,

일부 시료를 제외하면 대부분의 시료에서 기존 발표 자료와 거의 유사한  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비의 범위를 보이고 있다. 타클라마칸 사막의 모래는 0.71354에서 0.71596의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 보이며, 평균값은 0.71417( $n=11$ )이다. 이번 연구에서 분석한 타클라마칸 사막의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비의 범위가 기존에 발표된  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비 보다 다소 좁은 범위를 보인다. 이는 본 연구에서 채취한 타클라마칸 시료는 사막의 중앙부에서 채취한 것으로서, 기존의 사막 주변에서 채취한 시료와의 차별성을 보이는 것으로 판단된다. 하지만 평균값은 매우 유사한 값을 보여, 전체적으로 볼 때 타클라마칸 사막은 비교적 균질한 조성을 갖는 것으로 판단된다. 바단지린과 텅거리 사막의 모래 시료는 각각 0.71513-0.71657 및 0.71771-0.71798 범위의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 갖으며, 평균은 각각 0.71584( $n=5$ )과 0.71785( $n=2$ )을 나타내고 있다. 기존에 발표된 바단지린 사막의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비는 이번에 분석한 결과와 매우 유사한  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비의 범위 및 평균값을 나타내고 있다. 한편 텅거리 사막의 경우 비록 이번 연구에서 분석된 개수는 적지만( $n=2$ ),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비는 매우 좁은 범위를 나타내고 있는 반면, 기존에 발표된 자료는 비교적 매우 넓은 조성을 나타내고 있다. 이번에 분석된 텅거리 사막의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비는 기존 자료의 범위에 포함되어 있으며, 그 평균값에 가깝다. 오도스 사막에서 채취한 모래의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비는 최소 0.71365에서 최대 0.71749의 범위를 보이며 평균값은 0.71511( $n=5$ )로서, 기존 발표된  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 포함하고 있다.

국내 토양(한국지질자원연구원 주변)은 평균이 0.71870( $n=3$ )으로서 매우 높은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 보여주고 있으며, 0.71734에서 0.72039의 범위를 나타내고 있다. 국내에서 황사 기간 채취한 퇴적황사는 0.71320의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 나타내고 있으며, 대기 중 황사부유물의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비는 0.71305를 갖는다. 황사부유물의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비가 퇴적황사에 비하여 낮은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 보이는 것은 퇴적황사 시료에 국내 기원의 미세먼지의 함량이 보다 많기 때문으로 생각된다. 즉 황사를 채취하는 공기채취기의 포집 위치가 퇴적황사의 포집 위치에 비해 높기 때문에 상대적으로 입도가 큰 국내 토양 기원의 물질의 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 한편 황사가 발령되지 않은 시기(비황사 기간)에 대기 중으로부터 침전된 건조퇴적물은 0.71516에

서 0.71570의 범위를 보이며, 평균값은 0.71543( $n=2$ )의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 갖는다. 비황사기간의 대기 부유물은 최소 0.71160에서 최고 0.71327의 범위를 보이며, 평균 0.71227( $n=10$ )의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 가진다. 비황사기간의 경우에도, 대기부유물이 건조퇴적물에 비해 낮은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 나타내고 있다.

#### 4.2. Nd 동위원소 분석결과

기존에 발표된 황토고원 황토의  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ 는 -11.2에서 -7.5( $n=11$ )의 범위를 보인다. 타클라마칸 사막의 경우에는, -12.0에서 -9.1( $n=5$ ), 텅거리 사막은 -12.6에서 -10.4( $n=3$ ), 오도스 사막은 -10.7, 그리고 구얼반통구터 사막은 -6.6에서 -5.2( $n=5$ )의 범위를 나타내고 있다. 이번 연구에서 수행한 Nd 동위원소의 분석 결과는 다음과 같다. 황토고원의 황토시료의  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ 는 -10.7이며, 타클라마칸 사막의 모래시료는 -9.6의  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ 를 갖는다. 알라산 사막에 해당되는 바단지린과 텅겔 사막에서는 각각 -13.5 및 -15.6로서 유사한  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ 를 나타내고 있으며, 오도스 사막은 이보다 낮은 -17.9의 조성비를 갖는다. 퇴적황사는 -9.5, 그리고 건조퇴적물( $n=2$ )은 -14.3에서 -14.4의  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ 를 보이며, 비황사 기간의  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ 가 높은 값을 나타내고 있다. 국내 토양의  $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ 는 -19.4로서, 퇴적황사 및 건조퇴적물에 비해 낮은 값을 보이고 있다.

### 5. 토 론

#### 5.1. Sr 동위원소 조성비의 비교

중국에 분포하고 있는 건조지대의 사막과 황토고원 등 황사 발원지 토양의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비는 일부 중첩되는 부분도 있으나, 대체적으로 각 모래시료 및 황토마다 특징적인  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  비율을 가지고 있었으며, 이러한 특성을 이용하여 국내에서 발생한 황사의 미세 먼지의 기원을 추적할 가능성이 있음을 알 수 있다.

국내 퇴적황사의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 값은 황토고원, 타클라마칸, 오도스, 구얼반통구터, 일리 분지의 사막 시료와 황토의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비 범위 내에 포함되어 있는 반면 알라산 고원에 위치하는 바단지린 및 텅거리 사막과는 일치하지 않는다(Table 1). 최근 중국 베이징의 미세 먼지의 발원지 규명 연구 결과(Takanori *et al.*, 2004)에 의하면, 황사의 발원지는 멀리 떨어져 있는 대규모 사막 보다는 최근에 사막화가 진행되고 있는 베이징에 인접한 사막임이 밝혀지고 있

**Table 1.** Sr-Nd isotope ratios of the soil in source areas and various samples in domestic area (Daejeon).

Locality	Longitude	Latitude	type	Sample No.	Sr(ppm)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ <sup>a</sup>
Central Loess Plateau	109.29	34.29	loess	L1	238.8	0.71408	0.51209	-10.7
	109.33	34.30	loess	L2	197.3	0.71439		
	109.06	35.07	loess	L3	433.9	0.71268		
	109.21	35.39	loess	L4	169.9	0.71503		
	107.58	35.54	loess	L5	162.2	0.71406		
	108.02	35.21	loess	L6	217.4	0.71474		
	108.13	35.19	loess	L7-1	178.0	0.71586		
	108.13	35.19	loess	L7-2	197.2	0.71501		
	108.14	34.33	loess	L8	198.3	0.71477		
	109.15	34.25	loess	L9	186.1	0.71418		
Takli- makan Desert	87.17	40.44	sand	TK1	222.3	0.71354	0.51215	-9.6
	88.22	39.56	sand	TK2	212.8	0.71376		
	88.15	39.26	sand	TK3	217.6	0.71371		
	87.01	38.41	sand	TK4	185.7	0.71596		
	87.01	38.41	sand	TK5	219.1	0.71533		
	84.54	38.11	sand	TK6	221.7	0.71426		
	84.36	38.22	sand	TK7	210.1	0.71435		
	83.55	38.49	sand	TK8	172.4	0.71372		
	82.52	37.35	sand	TK9	214.5	0.71374		
	83.07	38.09	sand	TK10	204.8	0.71360		
	83.30	38.52	sand	TK11	244.0	0.71390		
Badain Jaran Desert	101.20	42.09	sand	AL1	161.7	0.71657	0.51195	-13.5
	101.47	42.00	sand	AL2	190.1	0.71519		
	103.47	41.20	sand	AL3	152.8	0.71513		
	104.33	40.38	sand	AL4	132.1	0.71603		
	104.43	40.22	sand	AL5	139.1	0.71630		
Tennger Desert	105.39	39.08	sand	AL6	157.0	0.71798	0.51184	-15.6
	105.39	38.57	sand	AL7	144.7	0.71771		
Ordos Desert	107.43	39.14	sand	OR1	244.6	0.71470	0.51172	-17.9
	107.55	39.11	sand	OR2	243.6	0.71441		
	107.55	39.07	sand	OR3	247.9	0.71434		
	108.02	39.04	sand	OR4	239.0	0.71444		
	108.12	38.58	sand	OR5	252.9	0.71460		
	108.22	38.52	sand	OR6	237.2	0.71543		
	108.28	38.48	sand	OR7	288.2	0.71365		
	108.56	38.39	sand	OR8	317.4	0.71431		
	109.09	38.42	sand	OR9	315.3	0.71579		
	109.38	38.22	sand	OR10	299.1	0.71491		
	109.44	38.13	sand	OR11	267.7	0.71514		
	109.43	38.01	sand	OR12	140.7	0.71598		
	109.17	38.01	sand	OR13	176.0	0.71536		
	109.16	37.54	sand	OR14	223.0	0.71492		
	109.06	37.38	sand	OR15	145.9	0.71749		
	107.41	37.29	sand	OR16	177.5	0.71624		

Table 1. Continued

Locality	Longitude	Latitude	type	Sample No.	Sr(ppm)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	ε <sub>Nd(0)</sub> <sup>a</sup>
Daejeon Korea	127.21	36.22	Asian Dust <sup>1</sup>	sd-1	202.4	0.71320	0.51215	-9.5
	127.21	36.22	Aerosol <sup>1</sup>	F14	92.4	0.71305		
	127.21	36.22	Asian Dust <sup>2</sup>	nsd-1		0.71718		
	127.21	36.22	Asian Dust <sup>2</sup>	nsd-2	190.1	0.71516	0.51191	-14.3
	127.21	36.22	Asian Dust <sup>2</sup>	nsd-3	190.1	0.71570	0.51189	-14.4
	127.21	36.22	Aerosol <sup>2</sup>	F3	165.2	0.71348		
	127.21	36.22	Aerosol <sup>2</sup>	F4	169.7	0.71160		
	127.21	36.22	Aerosol <sup>2</sup>	F5	137.1	0.71182		
	127.21	36.22	Aerosol <sup>2</sup>	F8	108.8	0.71224		
	127.21	36.22	Aerosol <sup>2</sup>	F11	117.1	0.71243		
	127.21	36.22	Aerosol <sup>2</sup>	F12	147.2	0.71277		
	127.21	36.22	Aerosol <sup>2</sup>	F13	211.0	0.71238		
	127.21	36.22	Aerosol <sup>2</sup>	F18	209.5	0.71227		
	127.21	36.22	Aerosol <sup>2</sup>	F19	253.6	0.71292		
	127.21	36.22	Aerosol <sup>2</sup>	F27	148.6	0.71176		
	127.21	36.22	Soil	BG1	196.1	0.71734	0.51165	-19.4
	127.21	36.22	Soil	BG2	226.4	0.71837		
	127.21	36.22	Soil	BG3	73.0	0.72039		

Asian Dust<sup>1</sup>. Asian Dust sample deposited naturally using aluminum tray during the period of Asian Dust.  
 Asian Dust<sup>2</sup>. Asian Dust samples deposited naturally using aluminum tray during the period of non-Asian Dust.  
 Aerosol<sup>1</sup>. Aerosol samples using high volume air sampler during the period of Asian Dust.  
 Aerosol<sup>2</sup>. Aerosol samples using high volume air sampler during the period of non-Asian Dust.  
<sup>a</sup>ε<sub>Nd(0)</sub> = ((<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>sample</sub> / (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub> - 1) × 10,000; (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub> = 0.512638

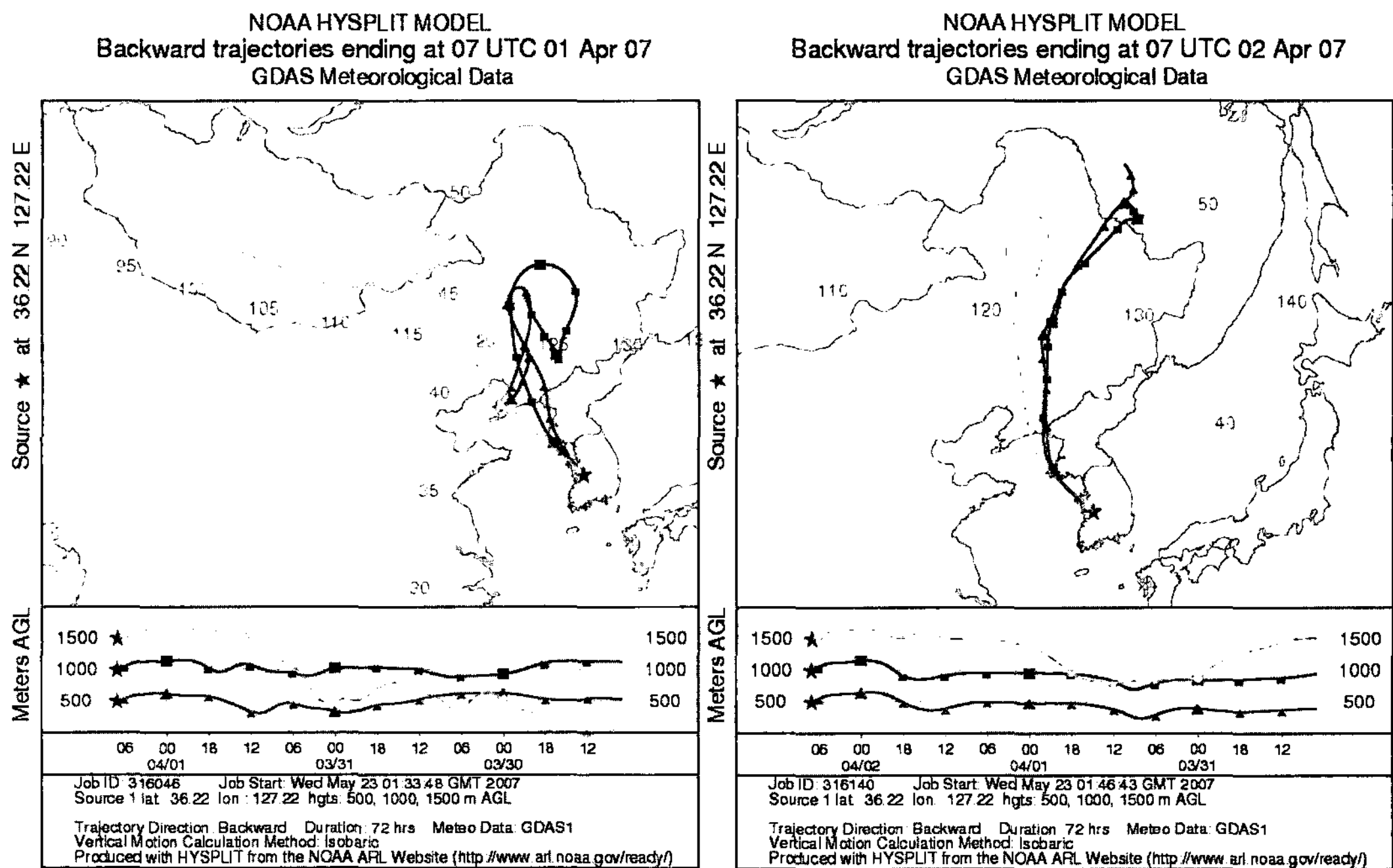


Fig. 2. Backward trajectories reconstructed using the NOAA ARL Website (www.arl.noaa.gov/ready), in 31 March and 1 April at Daejeon.

다. 따라서 퇴적황사의 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 동위원소 조성비를 갖는 사막 중 타클라마칸, 구얼반통구터 사막과 일리 분

지는 거리가 너무 멀리 떨어져 있어, 국내 퇴적황사의 발원지로서의 가능성이 상대적으로 낮을 것으로 판단

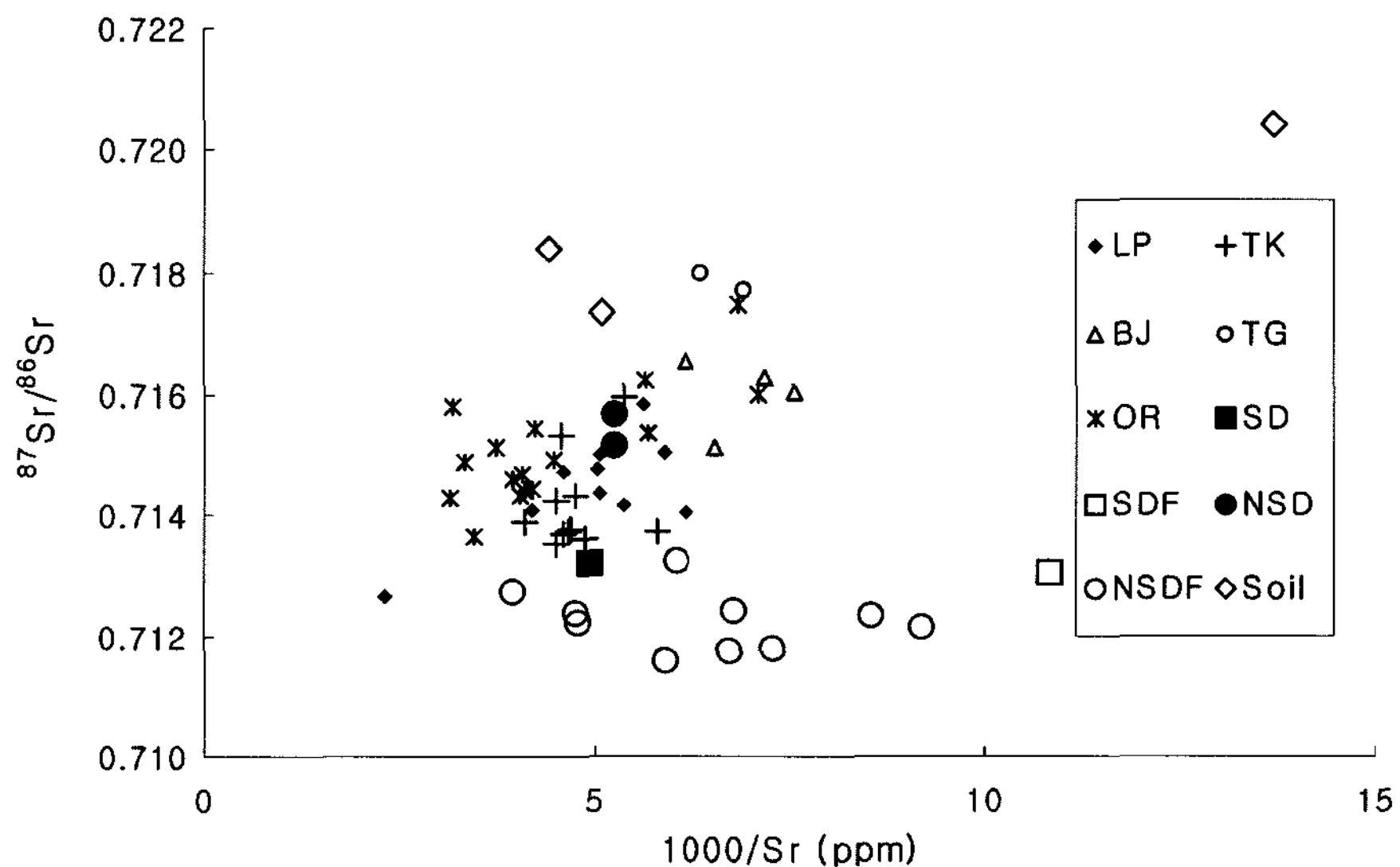
된다. 이는 미국 NOAA에서 제공하는 HYSPLIT 모델을 이용한 기단의 이동(Back Trajectory) 결과에서 알 수 있다(Fig. 2). 하지만 황사발원지로서의 가능성을 배제할 수는 없다. 따라서  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 근거로, 황토고원 또는 오도스 사막이 국내 퇴적황사의 유력한 발원지로 추정된다.

전체적으로 볼 때, 황사 기간에 채취한 퇴적황사와 황사부유물, 그리고 비황사 기간에 채취한 건조퇴적물과 대기부유물은 유사한  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 보이고 있다. 이는 시료의 채취 시기가 3월-4월 사이로, 기상청에서 황사 주의보/경보의 발령 시는 물론, 발령을 하지 않은 시기인 비황사 시기에도 발원지로부터 지속적으로 미세먼지가 이동해 오거나, 또는 황사 발생 중 미세먼지가 오랜 동안 대기 중에 부유하고 있다가 서서히 침전되기 때문으로 사료된다. 보다 자세히 살펴보면, 대체적으로 황사 시기의 퇴적황사 및 황사부유물의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비가 비황사 기간의 건조퇴적물 및 대기부유물에 비해서 다소 높은 함량을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 황사 기간 동안에 발원지로부터 이동된 황사가 더 많이 포함되어 있음을 의미하며, 비황사기간에는 국내 에어러졸의 영향을 더 많이 받고 있다는 것을 지시한다. 국내 토양의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비는 퇴적황사 및 황사부유물에 비해 매우 높은 값을 나타내고 있어, 국내 퇴적황사에 미치는 국내 토양의 영향은 매우 적은

것으로 사료된다. 황사기간에 채취한 Sd-1과 F14의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비는 각각 0.71320 및 0.71305로서, 발원지토양(황토고원)에 가장 근접한 조성비를 나타내고 있다. 하지만 L3(황토고원) 시료를 제외한 모든 발원지 토양에 비해 낮은 값을 보이고 있는데, 이는 황사와 국내 에어러졸의 혼합이 있음을 지시하고 있다. 이와 같은 혼합증거는 비황사기간의 시료에서 더욱 잘 나타나는데, 대체적으로 미세먼지의 질량농도(TSP)와 동위원소의 조성비가 비례하는 경향을 보인다. 특히 비황사기간에 채취한 F19(4월 4일)는 비교적 높은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비(0.71292)를 보이고 있는데, 이는 강력한 황사가 발생(3월 31일-4월 2일; sd-1)한 뒤의 2일 후로서, 황사 발생 중 미세먼지가 오랜 동안 대기 중에 부유하고 있다가 서서히 침전되기 때문으로 사료된다. 한편 일부 비황사기간에 채취한 시료(건조퇴적물 및 F3)에서 높은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비를 나타내고 있는데, 이는 비황사 기간 동안 국내 토양의 영향을 많이 받은 것으로 추정되지만, 국내외 다른 기원 또는 시료 채취장소에서의 오염에 의한 가능성도 배제할 수 없으며, 그 원인의 규명을 위해서는 보다 많은 자료가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

**5.2 Sr 동위원소 조성비와 함량 간의 상관관계**

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비와 Sr 함량(ppm) 사이의 상관관계(Fig. 3)를 보면, 전반적으로 황사기간의 시료



**Fig. 3.** Relationship of 1000/Sr contents (ppm) and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotopic ratios between the soil of source areas and Asian Dust in domestic area. Abbreviation: LP, Central Loess Plateau; TK, Taklimakan Desert; BJ, Badain Jaran Desert; TG, Tengger Desert; OR, Ordos Desert; SD, Sediments deposited during Asian Dust period; SDF, Aerosols during Asian Dust period; NSD, Sediments deposited during non-Asian Dust period; NSDF, Aerosols during non-Asian Dust period; Soil, Domestic Soil.



(sd-1)에서 높은 동위원소 조성비 및 Sr 함량을 나타낸 반면, 비황사기간에서는 반대 경향을 보이고 있다. 황사 기간에 침전한 퇴적황사(sd-1)는 타클라마칸 사막과 매우 유사한  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비와 함량을 보이는 반면, 비황사기간 중 대부분의 대기부유물은 낮은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비와 Sr 함량을 보인다. 비황사기간의 부유퇴적물 중에서 F18, F19 및 F13은 퇴적황사(sd-1)에 근접한 상대적으로 높은 동위원소 조성비와 함량을 보이고 있는데, F18 및 F19는 전술한 바와 같이 강력한 황사가 발생한 다음 날(4월 3일 및 4일)에 채취한 것으로, 대기 중에 남아있던 미세한 먼지가 침전된 결과로 해석되며, F13은 상대적인 미세먼지의 질량농도가 높은 것에 기인하는 것으로 생각된다. 하지만 황사시기의 황사부유물(F14)은 높은 동위원소 조성비를 갖으나, Sr 함량(92.4 ppm)은 매우 낮게 나타났으며, 반대로 비황사시기의 건조퇴적물(NSD)과 일부 대기부유물(F3)은 높은 동위원소 조성비 및 Sr 함량을 나타내고 있어, 이에 대한 추가적인 분석 및 고찰이 필요하다.

위의 결과를 종합해볼 때, 2007년도 봄철에 강력한 황사가 발생하였던 3월 31일-4월 2일의 퇴적황사(sd-1)는 타클라마칸 사막과 밀접한 관련성을 보이며, 다음으로 황토고원 또는 오도스 사막과 관계가 있는 것으로 보인다. 하지만 전술한 바와 같이 타클라마칸 사막은 우리나라와 너무 멀리 떨어져 있기 때문에, 국내 황사 발생의 주요 발원지일 가능성이 상대적으로 낮다. 한편 바단지린과 텡거리 사막과는 확실히 다른 분포를 보이고 있어 이들 사막과는 관련이 없는 것으로 생각된다. 따라서 퇴적황사(sd-1)의 발원지가 황토고원 또는 오도스 사막일 가능성이 높은 것으로 판단된다.

만약 황사시기 및 비황사시기의 국내 미세먼지가 모두 중국의 황사 발원지로부터 이동된 미세먼지에 의해 영향을 받았다고 가정한다면(채취기간이 주로 3-4월이기 때문에 타당한 가정임),  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비와 Sr 함량의 관계로부터 이들이 국내 대기 중 에어러졸과, 중국 발원지 중 황토고원 및 오도스 사막으로부터 이동된 미세먼지와 혼합된 결과임을 지시한다. 비록 이번 연구에서 국내 대기 중 에어러졸의 Sr 동위원

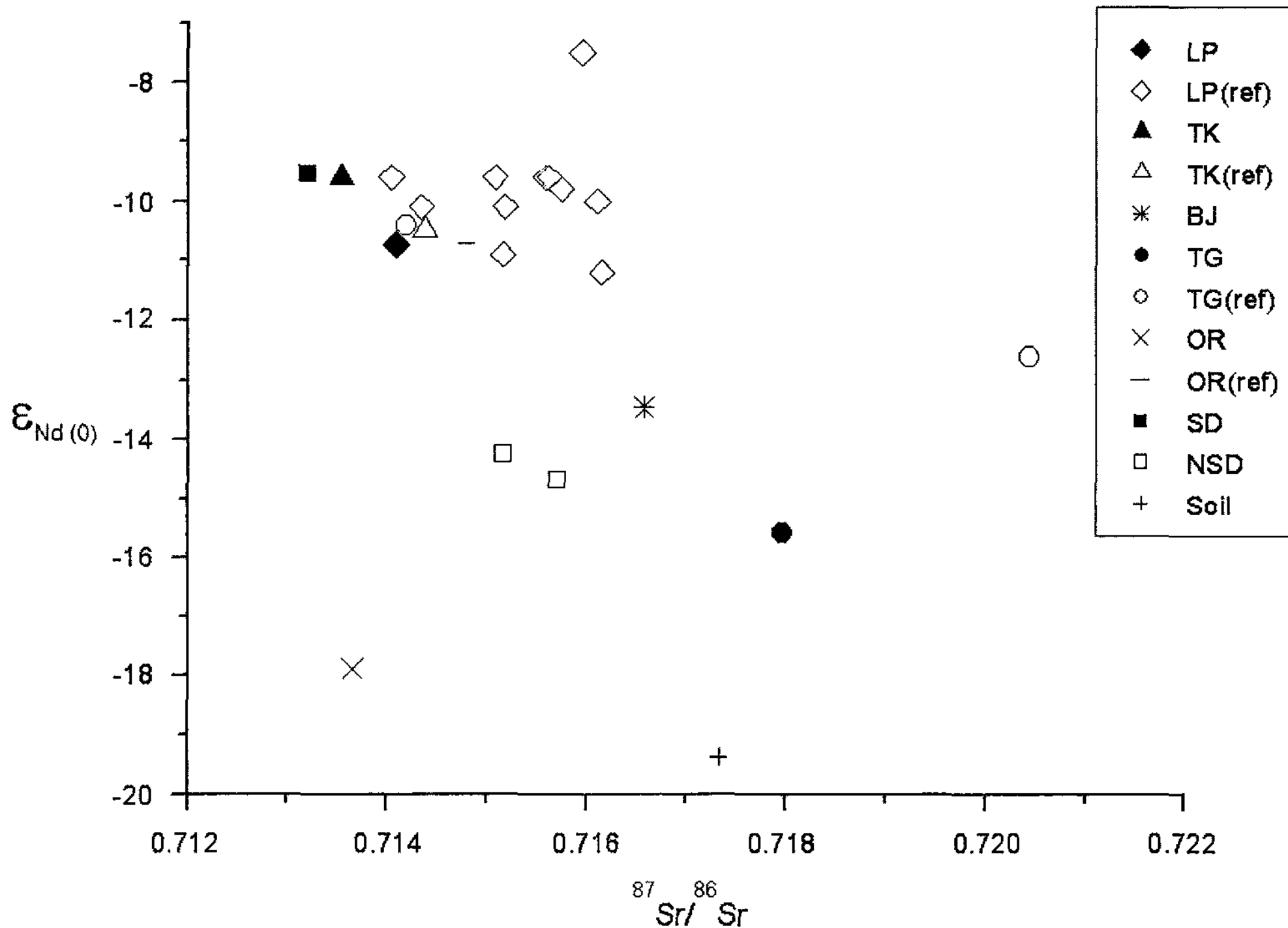


Fig. 4. Relationship of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  isotope ratios between the soils of source areas and Asian Dust in domestic area. Abbreviation: LP, Central Loess Plateau; TK, Taklimakan Desert; BJ, Badain Jaran Desert; TG, Tengger Desert; OR, Ordos Desert; SD, Sediments deposited during Asian Dust period; NSD, Sediments deposited during non-Asian Dust period; Soil, Domestic Soil; (ref), published data.

소 조성비와 Sr 함량(ppm)을 구하지 못하였으나, 비황사 기간의 대기 부유물의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비와 Sr 함량이 낮은 것으로 판단할 때, 국내 에어러졸의 배경값은 이보다 훨씬 더 낮을 것으로 추정된다. 만약 가장 낮은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비와 Sr 함량을 나타내는 비황사기간의 대기부유물(F4)을 국내 에어러졸의 배경값이라고 가정하면, 황사의 발원지가 오도스 사막일 가능성이 높은 것으로 판단된다. 하지만 국내 에

어러졸의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비가 더 낮다면, 황토고원과 오도스 사막 등 두 지역 모두에서 기원하였을 가능성이 있다. 실제로 오도스 사막과 황토고원은 공간적으로 매우 인접하여 분포하고 있으며, 최근 연구에 의하면 황토고원에 분포하는 황토는 장기적인 기후 변화에 따른 몬순작용의 우세에 따라 오도스와 텡거리 등 북부의 사막에서 기원하였다고 한다(Wang *et al.*, 2007). 따라서 황토고원과 오도스 사막의 구분이 명확

**Table 2.** Published data for the Sr and Nd isotope ratios in the source areas of Asian Dust

Local-ity	Site	Soil Type	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}(0)}$	References
Central Loess Plateau	Lanzhou	loess	0.71404	0.51215	-9.6	Nakai(1993)
	Lanzhou	loess	0.71434	0.51212	-10.1	Yokoo(2004)
	Luochuan	loess	0.71508	0.51214	-9.6	Gallet(1996)
		loess	0.71515	0.51208	-10.9	Liu(1994)
	Luochuan	loess	0.71518	0.51212	-10.1	Gallet(1996)
	Luochuan	loess	0.71559	0.51214	-9.6	Gallet(1996)
	Luochuan	loess	0.71562	0.51213	-9.9	Gallet(1996)
	Luochuan	loess	0.71574	0.51213	-9.8	Gallet(1996)
	Xian	loess	0.71595	0.51225	-7.5	Yokoo(2004)
	Luochuan	loess	0.71605			Gallet(1996)
	Luochuan	loess	0.71610	0.51213	-10.0	Gallet(1996)
		loess	0.71615	0.51206	-11.2	Liu(1994)
	Lanzhou	loess	0.71812			Asahara(1995)
Takli- makan Desert		loess	0.71229	0.51205	-11.6	Liu(1994)
	Yecheng	loess	0.71337			Yokoo(2001)
	Qira	loess	0.71379	0.51202	-12.0	Liu(1994)
		loess	0.71404			Yokoo(2001)
		loess	0.71413	0.51217	-9.1	Liu(1994)
		sand	0.71437	0.51210	-10.5	Liu(1994)
		sand	0.71480			Yokoo(2001)
loess	0.71592	0.51215	-11.5	Liu(1994)		
Badain Jara Desert	Bayan Mod	loess	0.71521			Yokoo(2001)
		sand	0.71657			Yokoo(2001)
Tennger Desert	Yinchuan	sand(<100 $\mu\text{m}$ )	0.71418	0.51211	-10.4	Yokoo(2004)
		loess	0.71463	0.51210	-10.6	Yokoo(2004)
		sand	0.72045	0.51199	-12.6	Yokoo(2004)
Ordos Desert		sand(<100 $\mu\text{m}$ )	0.71479	0.51209	-10.7	Yokoo(2004)
Hobq Desert	Paotou	sand	0.71293			Yokoo(2001)
Gurbantunggut Desert		lacustrine	0.70921	0.51237	-5.2	Liu(1994)
		lacustrine	0.70941	0.51233	-6.1	Liu(1994)
		lacustrine	0.70943	0.51235	-5.6	Liu(1994)
		lacustrine	0.70971	0.51230	-6.6	Liu(1994)
		loess	0.71127	0.51237	-5.3	Liu(1994)
	Urumuqi	sand	0.71385			Yokoo(2001)
Yil Basin		loess	0.71252			Kanayama(2002)
		loess	0.71297			Kanayama(2002)
		loess	0.71363			Kanayama(2002)
		loess	0.71668			Kanayama(2002)
Qaidam Desert	Dunghuang	sand	0.71489			Yokoo(2001)

히 나타나지 않을 수 있다. 따라서  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비 및 Sr 함량 결과로 볼 때, 국내 퇴적황사의 기원이 황토고원 및 오도스 사막으로 보는 것이 합리적이라 하겠다.

### 5.3. Sr-Nd 동위원소 조성비 간의 상관관계

Sr과 Nd 동위원소 조성비의 상관관계(Fig. 4)를 살펴보면, 황사 시기의 퇴적황사는 타클라마칸 사막의 모래 시료와 가장 근접한 관련성을 보이고 있다. 하지만 전술한 바와 같이 타클라마칸 사막은 우리나라와 너무 멀리 떨어져 있기 때문에, 타클라마칸의 모래가 우리나라의 황사에 직접적인 영향을 주었을 거라는 점은 일단 제외시킨다. 타클라마칸 사막 다음으로 유사한 Sr-Nd 동위원소 상관관계를 보이는 발원지는 황토고원이다. 특히 이번에 분석된 황토고원의 황토와 기존에 발표된 자료를 비교해보면, Sr 동위원소의 조성비는 다양한 범위를 보이나, Nd 동위원소 조성비는 거의 일정한 값을 나타내고 있으며, 이 값은 황사 시기의 퇴적황사와 유사한 조성비를 보여주고 있다.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비는 구성광물 및 입자의 크기에 따라 그 조성비가 다양하게 변화한다고 알려져 있다(Wenbo *et al.*, 2006). 즉, 입자가 작을수록, 그리고 탄산염광물이 감소할수록 Sr 동위원소의 조성비가 증가한다. 반면에  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  동위원소 조성비는 입도 및 광물의 종류에 관계없이 일정한 값을 나타낸다고 알려져 있다(Wenbo *et al.*, 2006). 따라서 이번에 분석한 Sr-Nd 동위원소 분석결과에서 퇴적황사와 황토고원의 Nd 동위원소의 조성비가 일치하고 있음은, 입도의 크기 및 전처리 여부에 관계없이 황토고원이 유력한 황사의 발원지임을 지시하고 있다.

한편 오도스 사막과 텅거리 사막은 퇴적황사와 유사한 Sr-Nd 동위원소 조성비를 보이는 시료도 있으나, 전혀 다른 조성비를 갖는 시료도 있다. 이와 같은 Sr-Nd 동위원소 조성비의 차이는 발원지 토양의 입도 차이(Table 1 및 2; bulk 및  $<100\ \mu\text{m}$ ) 또는 사막 시료의 불균질성에 의해 기인한 것으로 보인다. 특히, 오도스 사막은 황토고원과 함께 국내 황사의 가능성 있는 발원지로 생각되어 왔다. 하지만 이와 같이 다양한 Sr-Nd 동위원소 조성비를 보이고 있기 때문에 그 가능성은 황토고원에 비해서 다소 낮다고 판단된다. 한편 국내 토양은 Sr-Nd 동위원소 조성비가 매우 높게 나타나고 있어, 황사에 영향을 미치지 않았음을 제시해준다. 특이한 점은 비황사기간의 건조퇴적물의 Sr-Nd 동위원소 조성비가 국내 토양과 퇴적황사의 중간에 위치하고

있다는 점이다. 이는 황사 기간에 미처 퇴적되지 못하고 대기 중에 잔류하고 있던 미세먼지가 대기 중 에어러졸 또는 국내 토양과 혼합되었을 가능성을 제시해준다. 하지만 이는 향후 국내 에어러졸의 Sr-Nd 동위원소 조성비의 배경값 및 추가적인 자료를 얻은 후, 고찰하여야 한다.

## 6. 결 론

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소 조성비 및 함량 분석결과, 2007년 봄철(3월 31일-4월 2일)에 발생한 황사의 발원지는 황토고원 및 오도스 사막으로 판단된다(Fig. 3 and 4). Sr-Nd 동위원소 상관관계에서 보면, 오도스 사막보다는 황토고원이 국내 퇴적황사의 발원지일 가능성이 더 높은 것으로 판단된다. 특히 퇴적황사와 황토고원의  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  동위원소 조성비가 일치하고 있음은, 황토고원이 유력한 황사의 발원지임을 지시하고 있다. 한편 타클라마칸 사막의 Sr-Nd 동위원소 조성비 또한 국내 퇴적황사 및 황사와 매우 유사한 범위를 보여주고 있으나, 우리나라와는 너무 먼 거리에 위치하고 있어, 가능성이 낮을 것으로 판단된다.

이와 같은 연구결과는 발원지 별 황사의 유해성 연구결과와 연계시켜 발원지 별 황사에 의한 국민 건강 및 산업체 피해 등에 대한 과학적이고 실용적인 예보 및 대처방안의 기본 자료로 활용될 것으로 기대된다. 한편 사막화방지 사업을 추진하고 있는 대상 발원지 사막의 선정에 활용될 수 있으며, 황사예보를 위한 수치모델링의 정확도 향상을 위한 기본 및 검증 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 소방방재청(NEMA) 자연재해저감기술개발사업의 퇴적황사재해 피해평가 및 대응기술개발사업(NEMA-06-NH-08)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Asahara Y., Tanaka, T., Kamioka, H. and Nishimura, A. (1995) Asian continental nature of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios in north central Pacific sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 133, p. 105-116.
- Asahara, Y. (1999)  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variation in north Pacific sediments: a record of the Milankovitch cycle in the past 3 million years. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 171, p. 453-

- 464.
- Biscaye, P.E., Grousset, F.E., Revel, M., Van der Gaast, S., Zielinski, G.A., Vaars, A. and Kukla, G. (1997) Asian provenance of glacial dust (stage 2) in the Greenland Ice sheet Project 2 ice core, summit, Greenland. *Journal of Geophysical Research* 102, 26765-26781.17.
- Bogaard, A. E. and Stobberingh, E. E. (2000) Epidemiology of resistance to antibiotics links between animals and humans. *Int. J. Antimicrobiol. Ag.*, v. 14, p. 327-335.
- Bory, A.J., Biscaye, P.E., Svensson, A. and Grousset, F. E. (2002) Seasonal variability in the origin of recent atmospheric mineral dust at Northgrip, Greenland. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 190, 123-134.
- Chadwick, O.A., Derry, L.A., Vitousek, P.M., Huebert, B.J. and Hedin, L.O. (1999) Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature*, v. 397, p. 491-497.
- Chen, J., Li, G., Yang, J., Rao, W., Lu, H., Balsam, W., Sun Y. and Ji, J. (2007) Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: Implications for the provenances of Asian dust. *Geochim. et Cosmochim. acta*, v. 74, p. 3904-3914.
- Chun, Y.S., Cho, K.S., Kim, Y.H. and Lee, J.K. (2003) The Features of Asian Dust Events Originated in Keoelchin Sandy Land. *J. Korean Meteor. Soc.*, v. 39, p. 251-263.
- Chun, Y., Boo, K.-O., Kim, J., Park, S.-U. and Lee, M. (2001) Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea. *J. Geophysic. Res.*, v. 106, p. 18461-18469.
- Chung, Y.-S., Kim, H.-S., Dulam, J. and Harris, J. (2003) On heavy dustfall observed with explosive sandstorms in Chongwon-Chongju, Korea in 2002. *Atmos. Environ.*, v. 37, p. 3425-3433.
- Duce, R.A. (1995) Sources, distribution, and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate. In: Charlson, R.J. and Heintzenberg, J., Editors, 1995. *Aerosol Forcing of Climate*, Wiley, New York, p. 43-72.
- Gallet, S., Jahn, B. and Torii, M. (1996) Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications. *Chem. Geol.*, v. 133, p. 67-88.
- Gao, T., Yu, X., Mu, Q., Li, H., Li, X. and Si, Y. (2003) Climatology and trends of the temporal and spatial distribution of sandstorms in inner Mongolia. *Water, Air, and Soil Pollution Focus*, v. 32, p. 51-66.
- Grousset, F., Ginoux, P., Bory, A. and Biscaye, P.F. (2003) Case study of a Chinese dust plume reaching the French Alps. *Geophysic. Res. Lett.*, v. 30, p. 10-11.
- Husar, R.B., Tratt, D.M., Schichtel, B.A., Falke, S.R., Li, F., Jaffe, D., Gasso, S., Gill, T., Laulainen, N.S., Lu, F., Reheis, M.C., Chun, Y., Westphal, D., Holben, B.N., Gueymard, C., McKendry, I., Kuring, N., Feldman, G.C., McClain, C., Frouin, R.J., Merrill, J., DuBois, D., Vignola, F., Murayama, T., Nickovic, S., Wilxon, W.E., Sassen, K. and Sugimoto, N. (2001). The Asian dust events of April 1998. *J. Geophysic. Res.*, v. 106, p. 18317-18330.
- Kanayama, S., Yabuki, S., Yanagisawa, F. and Motoyama, R. (2002), The chemical and strontium isotope composition of atmospheric aerosols over Japan: the contribution of long-range-transported Asian dust (Kosa). *Atmos. Environ.*, v. 36, p. 5159-5175.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (<http://www.kma.go.kr>)
- Kurosaki, Y. and Mikami, M. (2003) Recent frequent dust events and their relation to surface wind in East Asia. *Geophysic. Res. Lett.*, v. 30, no. 14, p. 1-4.
- Liu, C.Q., Masuda, A., Okada, A., Yabuki, S. and Fan, Z.L. (1994) Isotope geochemistry of Quaternary deposits from the arid lands in northern China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 127, p. 25-38.
- Nakai, S.N., Halliday, A.N. and Rea, D.K. (1993) Provenance of dust in the Pacific Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 119, p. 143-157.
- Nakano T., Yokoo Y., Nishikawa M. and Koyanagi H. (2004) Regional Sr-Nd isotopic ratios of soil minerals in northern China as Asian dust fingerprints. *Atmos. Environ.*, v. 38, p. 3061-3067.
- Sheehy, D.A. (1992) A perspective on desertification of grazing land and ecosystems in North China. *Ambio*, v. 21, p. 303-307.
- Sun, J., Liu, T. and Lei, Z. (2000) Source of heavy dust fall in Beijing, China on 16 April, 1998. *Geophysic. Res. Lett.*, v. 27, p. 2105-2108.
- Sun, J., Zhang, M. and Liu, T. (2002) Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960-1999: relations to source area and climate. *J. Geophysic. Res.*, v. 106, p. 18325-18333.
- Wang Y., Yang J., Chen J., Ahang, K. and Rao, W. (2007) The Sr and Nd isotopic variations of the Chinese Loess Plateau during the past 7 Ma: Implications for the East Asian winter monsoon and source areas of loess. *PALAEO*, v. 249, p. 351-361.
- Wenbo R., Jiedong Y., Jun C. and Gaojun L. (2006) Sr-Nd isotope geochemistry of eolian dust of the arid-semi-arid areas in China: Implications for loess provenance and monsoon evolution. *Chinese Sci. Bull.*, v. 51, no. 12, p. 1404-1412.
- Wilkening, K.E., Barrie, L.A. and Engle, M.A. (2000) Trans-Pacific air pollution. *Science*, v. 290, p. 65-67.
- Xuan, J. and Sokolik, N. (2002) Characterization of sources and emission rates of mineral dust in northern China. *Atmos. Environ.*, v. 36, p. 4863-4867.
- Yokoo Y., Nakano T., Nishikawa M. and Quan H. (2001) The importance of Sr isotopic compositions as an indicator of acid-soluble minerals in arid soils in China. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 130, p. 763-768.
- Yokoo Y., Nakano T., Nishikawa M. and Quan H. (2004) Mineralogical variation of Sr-Nd isotopic and elemental compositions in loess and desert sand from the central Loess Plateau in China as a provenance tracer of wet and dry deposition in the northwestern Pacific. *Chem. Geol.*, v. 204, p. 45-62.
- Zhang, X., Arimoto, R., Gao, J.J., An, Z. and Wang, D. (2001) Atmospheric dust aerosol over the Tibetan plateau. *J. Geophysic. Res.*, v. 106, p. 18471-18476.
- Zhu, Z.X., Wang, W., Wu, G., Kang, C., Zhu, F.Y. and Wang, T. (1992) China: desertification mapping and desert reclamation. *World Atlas of Desertification*, United Nations Environment Programme, p. 46-49.