위성기반 가뭄지수의 EOF 분석: 내몽골 지역을 사례로

김광진¹ · 김대선¹ · 조재일¹ · 홍성욱² · 이양원¹

¹부경대학교 공간정보시스템공학과

²국가기상위성센터 위성분석과

(2013년 11월 9일 접수, 2013년 11월 25일 수정, 2013년 12월 5일 게재 확정)

EOF Analysis of Satellite-based Drought Indices: A Case of Inner Mongolian Region

Kwang-Jin Kim¹ · Dae-Sun Kim¹ · Jaeil Cho¹ · Sung-Wook Hong² · Yang-Won Lee¹

¹Dept. of Spatial Information Engineering, Pukyong National University

²Satellite Analysis Division, National Meteorological Satellite Center

(Received 9 November 2013, Revised 25 November 2013, Accepted 5 December 2013)

Abstract : In this study, we produced satellite-based drought indices such as NDVI(normalized difference vegetation index), NDWI(normalized difference water index), and NDDI(normalized difference drought index) and extracted time-series principal components from the drought indices using EOF(empirical orthogonal function) method to examine their relationships with climatic variables. We found that the first principal components of the drought indices for Sonid Right Banner, Inner Mongolia were dominant in cold seasons and were closely related to low temperature, little rainfall, and high surface albedo. The satellite-based drought indices and their EOF analyses can be utilized for the studies of cold-season drought and warm-season drought as well.

Key Words : Satellite data, Drought index, EOF, Climatic variable

1. 서론

가뭄은 다른 자연재해와 달리 급격히 진행되지는 않으나 지속적인 기상현상과 더불어 넓은 지역에 생태적, 사회적, 경제적으로 치명적 영향을 미치는 경우가 대부분이다. 또한 최근의 기후변화에 의한 영향으로 가뭄은 예기치 않게 세계 곳곳에서 빈번하고도 강력하게 발생하고 있다(Gou-

veia *et al.*, 2012). 따라서 광역을 대상으로 지속적인 가뭄 모니터링이 요구되고 있으며, 기술적으로 위성원격탐사가 그 역할을 적극적으로 수행할 것이 기대되어지고 있다. 이에 따라 선행연구에서 다양한 위성기반 가뭄지수가 개발 및 적용되어 왔지만(예, Unganai and Kogan, 1998, Yang *et al.*, 1998; Peters *et al.*, 2002; Sandholt *et al.*, 2002; Ji and Peters, 2003; Wan *et al.*, 2004; Ghulam *et*

al., 2007; Gu *et al.*, 2007; Wang and Qu, 2007; Karnieli *et al.*, 2010), 가뭄은 정확히 정의하는 것이 힘들며 복합적 요인에 의해 발현되는 현상으로서, 선행연구에서 표준적으로 추천되는 가뭄지수는 없는 상황이다. 오히려 동일한 곳의 수분 스트레스에 대해 각기 다른 성능 및 민감도를 가지는 가뭄지수들이 제각각의 평가를 내림으로써 가뭄 여부 및 진행 판단에 혼란을 초래하기도 한다.

일반적으로 가뭄은 일정기간 내의 강우량에 강력히 지배된다고 알려져 있지만, 그보다는 강우가 발생하지 않은 지속기간 동안의 여러 가지 복합적인 기상 및 환경 요인이 더욱 중요하다는 것이 밝혀지고 있다(Wu *et al.*, 2011). 이에 따라 일반적으로 기상관측소의 장기관측을 기반으로 가뭄의 판단 및 분석이 이루어졌지만, 조밀한 지상관측 네트워크를 구축하여 위성원격탐사와 같이 광역을 모니터링 하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 기온, 강수, 풍속, 토양수분, 지면온도, 지면알베도와 같은 가뭄의 원인 및 지표가 되는 지상관측 자료와 가뭄 모니터링을 위한 위성산출 인덱스와 상관관계를 분석한 정보는 광역에서의 가뭄 강도, 기간, 공간범위를 파악하는 데 도움을 줄 것으로 기대된다.

가뭄현상의 지속·소멸 그리고 확장·축소와 같은 시공간적인 변동성은 가뭄 메커니즘을 이해하는데 있어 중요한 요소이기 때문에 위성기반 가뭄지수와 지상관측자료와 상관관계를 분석할 때에는 적절한 통계분석법이 요구된다. EOF(Empirical Orthogonal Function)는 시공간 변동성을 효과적으로 분석할 수 있는 기법으로서 시계열 주성분분석(principal component analysis)에 해당하며(Björnsson and Venegas, 1997), 원래 변수의 정보를 가장 잘 반영하는 몇 개의 고유함수만으로 관측치를 재현할 수 있기 때문에 가뭄의 시공간 변동성 파악을 위해 매우 유용한 분석법일 것이다.

본 연구에서는 최근 기후변화로 인한 가뭄빈도 증가로 사막화가 급격히 진행되고 있는 중국의 내몽골 지역을 연구대상으로 설정하여, 우선 기존연구에서 가뭄 모니터링에 빈번히 사용되고 있는 대표적 지수인 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index: 정규화식생지수), NDWI(Normalized Difference Water Index: 정규화수분지수), NDDI(Normalized Difference Drought Index: 정규화가뭄지수)를 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성자료를 이용하여 산출하고 EOF 분석을 통해 각 인덱스의 시계열 주성분을 추출하며, 이 주성분과 기후 및 지면 변수(기온, 강수, 풍속, 토양수분, 지면온도, 지면알베도 등)와의 상관관계를 분석한다. 이를 통해 사례지역 가뭄지수들은 어떠한 시계열 특성을 나타내는지, 각 가뭄지수 변동의 주성분은 무엇이며 어떠한 기후 및 지면 변수와 밀접한 관련을 가지는지에 대해 살펴보고자 한다.

2. 연구 지역 및 자료

연구지역인 내몽골 쑤니터우기는 IGBP(International Geosphere-Biosphere Programme) 피복분류상 초지(grassland)와 나지 또는 희박한 식생(barren or sparsely vegetated)이 혼재하는 곳이며(John *et al.*, 2008), 키펴 기후구분상 한랭사막과 한랭스텝이 만나는 지역으로서 항상 크고 작은 가뭄의 피해를 입고 있다. 연구지역의 공간범위는 42.5°N–43.5°N, 112°E–113°E로 하였으며(그림 1), 위성기반 가뭄지수인 NDVI, NDWI, NDDI를 산출하기 위하여 약 500×500m 해상도의 240×240 격자를 구성하였다. 사용된 MODIS 자료는 2003–2012년 MOD13A1(Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m)과 MCD43A4(Nadir

그림 1. 연구지역 - 내몽골 쉰터우기(Sonid Right Banner)

BRDF-Adjusted Reflectance 16-Day L3 Global 500m)이며, 연구지역을 포함하는 H26V04 타일을 취득하여 재가공하였다. 또한 세 가지 가뭄지수의 EOF 시계열을 기후 및 지면 변수와 비교하기 위하여 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: ECMWF)의 재분석자료 중 기온, 지면온도, 지면알베도, 토양수분, 풍속 자료와 CRU(Climatic Research Unit)의 강수 자료를 사용하였다.

3. 연구 방법

1) 가뭄지수 산출

첫째, NDVI는 857nm 근적외 밴드 반사도(ρ_{857})와 645nm 적색 밴드 반사도(ρ_{645})의 합과 차를 이

용하여 -1에서 1 사이의 값으로 산출되며, 이를 통해 나타나는 지표면 식생의 활성도는 가뭄의 정도를 모니터링 하는 데 활용된다. 일반적으로 양의 값을 가지며, 0에 가까울수록 낮은 식생활성도의 의미와 함께 강한 가뭄정도를 나타낸다.

$$NDVI = \frac{\rho_{857} - \rho_{645}}{\rho_{857} + \rho_{645}}$$

일반적으로 시계열 NDVI 값에는 구름 등의 영향으로 로우 피크(low peak) 현상이 발견되므로 이를 보정하여야 하는데, 본 연구에서는 기후 특성과 식생의 경년변동을 고려한 KJNU(Kongju National University)의 보정기법을 이용하였다(박주희 외, 2011). 우선 타겟 픽셀을 포함하여 전2년에서 후2년까지 총 5개 픽셀의 NDVI 값 중에서 구름이 많은 여름은 상위 2개 값, 구름이 적은 타

그림 2. NDVI 시계열 보정 전후 비교(예시)

계절은 상위 3개 값을 평균하여 참조값(reference value)으로 설정하였다. 시계열 가중치와 더불어 토지피복을 고려한 거리 가중치를 통해 반복적 보정을 실시하고도 여전히 노이즈로 남아있는 픽셀은 참조값으로 대체하였으며, 모든 노이즈가 제거된 후에도 시계열상 불규칙한 변동을 제거하기 위해 이동평균을 실시하였다. 그림 2는 연구지역 내 일부 픽셀의 예시로서, NDVI 보정 전후의 비교를 통해 로우 피크로 인한 노이즈가 상당히 제거되었음을 알 수 있다.

둘째, NDWI는 857nm 근적외 밴드 반사도(ρ_{857})와 1240nm 단파적외 밴드 반사도(ρ_{1240})의 합과 차를 이용하여 -1에서 1 사이의 값으로 산출되며 이를 통해 구한 지표면 수분상태는 가뭄 정도를 모니터링 하는 데 이용된다(Gao, 1996). 일반적으로 양의 값을 가지며, 0에 가까울수록 건조한 지면상태 및 강한 가뭄정도를 의미한다.

$$NDWI = \frac{\rho_{857} - \rho_{1240}}{\rho_{857} + \rho_{1240}}$$

이때, 구름 등으로 인해 근적외 밴드와 단파적외 밴드 반사도가 널값(null value)인 경우 이를 보간하기 위해서 본 연구에서는 시계열 보간과 공간 보간을 차례로 수행하였다. 시계열 보간에서는 타겟 픽셀의 전시기 2개 픽셀 평균과 후시기 2

개 픽셀 평균을 재차 평균하였다. 시계열 보간 후에도 널값으로 남아있는 픽셀에 대해서는 3×3 윈도우로부터 최대 15×15 윈도우로까지 순차적으로 확장해나가면서 근적외 밴드와 단파적외 밴드 반사도 값을 가진 픽셀이 윈도우 전체의 절반 이상이 될 때 그 평균을 취하였다.

셋째, NDDI는 원래부터 가뭄의 정도를 모니터링하기 위해 개발된 지수로서 앞서 나온 두 가지 가뭄지수인 NDVI와 NDWI의 합과 차를 이용하여 다음과 같이 산출한다. 보통 -1에서 1 사이의 값을 가지며, 0.5 이상이면 가뭄의 정도가 심한 것으로 파악한다. NDDI는 주로 NDVI와 NDWI 사이의 관계가 뚜렷하게 나타나는 초지에 적용하기에 적합하며, NDVI와 NDWI의 차가 커지는 여름철 가뭄을 두드러지게 반영한다(Gu *et al.*, 2007; Gouveia *et al.*, 2012).

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI}$$

또한, 지면온도와 NDVI를 이용한 VTCI(Vegetation Temperature Condition Index)도 가뭄 탐지에 활용되나, 산출에 필요한 계수가 시간대별로 일정하지 않아 지속적인 가뭄탐지에 한계가 있는 것으로 사료되어 제외하였으며, 적색 밴드와 단파적외 2개 밴드를 이용하여 산출하는

NMDI(Normalized Multi-band Drought Index)도 가뭄탐지를 위해 개발되었으나 아직은 그 활용사례가 매우 적어 본 연구에는 적용하지 않았다.

$$VTCl = \frac{LST_{NDVI, \max} - LST}{LST_{NDVI, \max} - LST_{NDVI, \min}}$$

$$NMDI = \frac{\rho_{857} - (\rho_{1640} - \rho_{2130})}{\rho_{857} + (\rho_{1640} - \rho_{2130})}$$

그림 3. EOF 분석을 위한 입력자료 행렬

2) EOF 분석

EOF는 원자료를 고유벡터로 변환함으로써 몇 개의 지표만으로 원래 정보를 요약적으로 제시할 수 있는 기법으로서, p 차원의 관측치를 서로 직교하도록 분해된 k 차원의 주성분으로 시간과 공간상에 축약하는 것이다(김소현, 1998; 이창원, 2002). 지점 $x_1, x_2, \dots, x_p$ 에서 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 이라는 시간에 측정된 값들은 그림 3과 같이 행렬 M에 p 개의 지점을 칼럼(column)으로 하여 n 개의 맵으로 로우(row)를 구성할 수 있으며, 이 행렬을 이용하여 EOF 분석을 수행하는 과정은 표 1과 같이 정리할 수 있다(Björnsson and Venegas, 1997).

4. 분석 결과

가뭄지수 변동을 EOF 기법으로 분석하기 위하여 2003-2012년 내몽골 쉰터우기 지역의 NDDI, NDVI, NDWI를 산출하였으며, 그 중 일부인 2012년 월별 이미지를 그림 4에 나타내었다. 지역특성상 11월에서 5월 사이에는 구름이 많아 6월에서 10월 기간에 비해 시공간적 불연속이 두드러지게 나타나고 있다. 산출된 세 가지 위성기반 가뭄지수로부터 EOF 주성분 1을 도출하였는데, NDDI 변동의 주성분은 2003-2004년을 제외하고 매년 겨울철에 강하게 작용하는 것으로 보

표 1. EOF 분석 절차

- ① 행렬 M의 하나의 로우(row)에는 한 장의 맵에 해당하는 데이터를 넣고, 각 칼럼(column) 방향으로 각 지점의 시계열을 구성
- ② 개별 값에서 시계열 평균을 감산하여 트렌드가 제거된 행렬 F를 구함

$$F = \text{detrrend}(M, 0)$$
- ③ 공분산 행렬 R을 구함

$$R = F' \times F$$
- ④ Eigen 분석을 통해 공분산 행렬의 고유벡터 C와 고유값 L을 도출

$$[C, L] = \text{eigen}(R)$$
- ⑤ F와 C로부터 i 번째 주성분을 구함

$$PC_i = F \times C(:, i)$$
- ⑥ 고유값 대각요소의 비율이 i 번째 주성분의 설명력을 나타냄

$$\text{diag}(L) / \text{trace}(L)$$

이며(그림 5), NDVI 변동의 주성분 역시 겨울철에 강하게 작용하는 것으로 나타났다(그림 6). 반면 NDWI 변동의 주성분은 2003-2004년을 제외하고 매년 겨울철에 매우 낮은 값을 보였다(그림 7). 연구지역에 적용한 세 가지 가뭄지수에서는 일반적으로 겨울 성분이 매우 뚜렷하게 나타났으며, 이는 겨울에 가뭄이 빈번히 나타나는 이 지역의 기후 특성과도 일치하여, 위성기반 가뭄지수가 기본적으로 이 지역의 가뭄분석에 부적합하지 않음을 보여준다.

기온, 지면온도, 지면알베도, 강수, 토양수분, 풍속 등 기후 및 지면 변수의 2003-2012년 월별 시계열 자료는 그림 8과 같다. 한랭사막과 한랭스텝 만나는 이 지역에서는 연중 가벼운 바람이 불고, 겨울철 낮은 기온과 적은 강수가 특징적이며, 토양수분의 계절적 변동이 일정정도 있으나, 대체로 늦가을에서 이른 봄에 사이에 가뭄이 빈번히 발생한다(Wu *et al.*, 2011). 또한 희박한 식생으로 인해 지면알베도는 비교적 높은 편이다. 위성기반 가뭄지수의 EOF 값과 이러한 기후 및 지면

그림 4. 산출된 NDDI(상), NDVI(중), NDWI(하)의 예시(2012년)

그림 5. NDDI EOF 1의 시계열 변화(2003-2012년)

그림 6. NDVI EOF 1의 시계열 변화(2003-2012년)

그림 7. NDWI EOF 1의 시계열 변화(2003-2012년)

그림 8. 기후 및 지면 변수의 시계열 변화(2003–2012년)

변수 사이의 상관성을 분석함으로써, 이 지역 가
 목지수 변동의 주성분이 어떠한 기후적 요소 또는
 지면의 생물리적 요소와 밀접한 관련이 있는지 살
 펴 볼 수 있다. 세 가지 위성기반 가목지수 중에서
 특히 NDVI 변동의 주성분은 기후 및 지면 변수
 와의 상관성이 두드러지게 나타났는데, 기온, 지
 면온도, 강수에 대해서는 강한 음의 상관관계(각
 각 $R=-0.82$, $R=-0.83$, $R=-0.82$)를 보이고, 지면
 알베도에 대해서는 강한 양의 상관관계($R=0.79$)
 를 나타냈다(표 2). 일반적으로 수분 스트레스가
 심한 곳에서는 NDVI와 온도가 강한 음의 상관
 보이며, 이는 여러 건조지역에서 확인된 바 있다

(Schultz and Halpert, 1995; Churkina and Run-
 ning, 1998; Julien and Sobrino, 2009; Karnieli *et*
al., 2010). 연구지역에서는 적은 강수로 인한 건
 조조건에서 낮은 온도로 인해 식생의 활성도가 대
 체로 떨어지며 이로 인해 지면알베도가 높게 나타
 나는 것으로 보인다. 이 지역 NDVI 시계열 변동
 의 주성분이 낮은 온도, 적은 강수, 희박한 식생
 과 강하게 연관된다는 것은, NDVI 특성을 통해
 수분 스트레스가 심한 건조지역에서의 겨울가목
 변동이 잘 파악될 수 있다는 것으로 해석된다.

이와는 달리, 미국 대평원의 여름 가목에 대한
 선행 연구에서는 NDWI가 NDVI보다 가목에 민

표 2. 가뭄지수 EOF1과 기후 및 지면 변수와의 상관계수

	기온	지면온도	지면알베도	강수	토양수분	풍속
NDDIEOF1	-0.63	-0.64	0.56	-0.26	-0.13	0.15
NDVIEOF1	-0.82	-0.83	0.79	-0.82	-0.12	0.60
NDWIEOF1	0.62	0.62	-0.53	0.29	-0.08	-0.11

유의수준 < 0.01(모든 경우에 대하여)

감한 것으로 나타났는데, 이는 생리적으로 식물이 수분 스트레스를 이겨내는 방식과 관련된다. 즉 여름가뭄으로 인한 지면의 수분 손실이, 깊은 뿌리를 가지는 사막 식생의 클로로필 손실보다 더 크게 나타나기 때문이다(Gu *et al.*, 2007). 한편, 미국 중서부의 여름 가뭄 분석에서는 NDWI와 NDVI가 비슷한 정도로 토양수분 변동에 대한 설명력을 가지는 것으로 파악되었다(Gu *et al.*, 2008). 또한, VTCI를 통해 미국 중서부에서 더운 계절 가뭄에 미치는 식생과 온도의 영향을 분석한 연구(Wan *et al.*, 2004)에서는 건조지역의 낮은 NDVI 조건에서 지면온도가 높을수록 가뭄의 경향이 심해지는 것으로 나타났다. 여름 가뭄과 겨울 가뭄의 메커니즘이 명확하게 밝혀지지 않았지만, 위성기반 가뭄지수는 그 해명을 위해 유용하게 쓰일 수 있으며, 더운 계절 가뭄분석에 적합한 가뭄지수와 추운 계절 가뭄분석에 적합한 가뭄지수를 상황과 목적에 따라 선택적으로 사용할 필요가 있다(Niemeyer, 2008).

몽골 쉰터우기 지역에서는 세 가지 가뭄지수 모두 겨울 성분이 강하게 나타났다. 특히 NDVI 변동의 주성분은 기후 및 지면 변수와의 상관성이 두드러지게 나타났는데, 온도와 강수에 대해 강한 음의 상관관계, 그리고 지면알베도에 대해서는 강한 양의 상관관계를 보였다. 위성기반 가뭄지수는 더운 계절 가뭄뿐 아니라, 내몽골 지역에서처럼 추운 계절 가뭄 변동의 주성분 파악을 위한 유용한 도구가 될 수 있으며, 상황과 목적에 따라 적절한 지수를 선택하기 위해서는 각 지수의 특성을 명확히 파악할 필요가 있을 것이다. 겨울철 가뭄은 잠재적으로 식생 GPP(Gross Primary Production)의 감소로 이어질 수 있으므로(Aires *et al.*, 2008), 본 연구의 방법과 결과는 내몽골 겨울철 가뭄과 GPP와의 연관성 및 사막화에 대한 향후 효과에 기여할 것으로 기대된다. 또한 가뭄지수 EOF 값과 기후 및 지면 변수와의 상관계수를 계절별로 분석하는 것은 가뭄의 시공간변동 메커니즘의 이해에 도움이 될 것이므로 이에 대한 추가적인 연구도 필요할 것이다.

5. 결론

이 연구에서는 위성기반의 대표적 가뭄지수인 NDVI, NDWI, NDDI를 산출하고 EOF 분석을 통해 시계열 주성분을 추출하여, 기온, 강수, 풍속, 토양수분, 지면온도, 지면알베도 등 기후 및 지면 변수와의 상관관계를 분석하였다. 내

사사

이 연구는 국가기상위성센터의 “2013년 기상위성 운영 및 활용 기술개발 사업”과 국토교통부의 “공간정보 전문인력 양성사업”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김소현, 1998, 마이크로파 위성자료의 하부 성층권 온도에 대한 경험직교함수 분석, 이화여자대학교 석사학위논문.
- 박주희 · 조아라 · 강전호 · 서명석, 2011, 시공간 연속성을 이용한 오염된 식생지수(GIMMS NDVI) 화소의 탐지 및 보정 기법 개발, 한국기상학회지, 21(4), 337-347.
- 이창원, 2002, 경험적 직교함수를 이용한 동해북부 바람응력의 겨울철 변동성, 한양대학교 석사학위논문.
- Aires, L. M. I., Pio, C. A., and Pereira J. S., 2008, Carbon dioxide exchange above a Mediterranean C3/C4 grassland during two climatologically contrasting years, *Global Change Biology*, 14(3), 539-555.
- Björnsson, H. and Venegas, S. A., 1997, *A manual for EOF and SVD analyses of climatic data*, CC-GCR Report No. 97-1, McGill University.
- Churkina, G. and Running, S. W., 1998, Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes, *Ecosystems*, 1(2), 206-215.
- Gao, B., 1996, NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266.
- Ghulam, A., Qin, Q., Teyip T., and Li, Z., 2007, Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 62(2), 150-164.
- Gouveia, C. M., Bastos, A., Trigo, R. M., and DaCamara, C. C., 2012, Drought impacts on vegetation in the pre- and post-fire events over Iberian Peninsula, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(10), 3123-3137.
- Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., and Wardlow, B., 2007, A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States, *Geophysical Research Letters*, 34, L06407.
- Gu, Y., Hunt, E., Wardlow, B., Basara, J. B., Brown, J. F., and Verdin, J. P., 2008, Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data, *Geophysical Research Letters*, 35, L22401.
- Ji, L. and Peters, A. J., 2003, Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices, *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 85-98.
- John, R., Chen, J., Lu, N., Guo, K., Liang, C., Wei, Y., Noormets, A., Ma, K., and Han, X., 2008, Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi-arid region of Inner Mongolia, *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2018-2032.
- Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R. T., Anderson, M., Imhoff, M. L., Gutman, G. G., Panov, N., and Goldberg, A., 2010, Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations, *Journal of Climate*, 23(3), 618-633.
- Niemeyer, S., 2008, New drought indices, 1st International Conference on Drought Management: Scientific and Technological Innovations, Zaragoza, June 12-14, 2008.
- Peters, A. J., Walter-Shea, E. A., Ji, L., Viña, A., Hayes, M., and Svoboda, M. D., 2002, Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(1), 71-75.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., and Andersen, J., 2002, A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status, *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), 213-224.

- Schultz, P. A. and Halper, M. S., 1995, Global analysis of the relationships among a vegetation index, precipitation and land surface temperature, *International Journal of Remote Sensing*, 16(15), 2755-2777.
- Unganai, L. S. and Kogan, F. N., 1998, Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data, *Remote Sensing of Environment*, 63(3), 219-232.
- Wan, Z., Wang, P., and Li, X., 2004, Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the Southern Great Plains, USA, *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 61-72.
- Wang, L. and Qu, J. J., 2007, NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing, *Geophysical Research Letters*, 34, L20405.
- Wu, Z., Lu, G., Wen, L., and Kuang, Y., 2011, Variation and trends of regional drought in China, *Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting 2011*.
- Yang, L., Wylie, B. K., Tieszen, L. L., and Reed, B. C., 1998, An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. northern and central Great Plains, *Remote Sensing of Environment*, 65(1), 25-37.