

グローバルリモートセンシングによる植生・土地被覆変動の抽出とその要因解析

Vegetation and Land Cover Change Detection by Global Remote Sensing and its Causal Analyses

近藤昭彦 (千葉大学環境リモートセンシング研究センター)

KONDOH, Akihiko *Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University*

Global vegetation and land cover changes from 1982 to 2000 are analyzed by using PAL (Pathfinder Advanced Very High Resolution Radiometer Land data sets). Annual integrated NDVI (NDVI), annual maximum NDVI (NDVImax), standard deviation on NDVI (NDVStd), annual maximum surface temperature (Tmax), and annual trajectory in NDVI-Ts (surface temperature) space (TRJ) are adopted as parameters that reflect surface conditions, and examined their linear trends from 1982 to 2000. As a result, non-random spatial patterns are obtained. Part of which can be explained by climate-driven trend as stated in previous papers, however, obvious human-driven trend can be detected. Causal analyses on vegetation and land cover changes requires the consideration of both climate-driven causes and human-driven causes, and the viewpoints of different spatial scales are necessary to understand both causes. The signals concerning changes in heat budget by agricultural practices in relatively large spatial extent are important findings that suggest the effect of human activities to local climate.

Key Words: vegetation and land cover changes, vegetation index, surface temperature, PAL, NOAA/AVHRR

PAL (Pathfinder Advanced Very High Resolution Radiometer Land data sets) を用いて全球スケールの植生・土地被覆変動解析を行った。NDVI の年間積算値 (NDVI)、年間最大 NDVI (NDVImax)、NDVI の標準偏差 (NDVStd)、年間最大地表面温度 (Tmax)、Ts-VI 空間における軌跡の傾き (TRJ)、の 5 つを地表面状態を表すパラメータと考え、1982 年から 2000 年の 19 年間のトレンド (NDVStd を除く) の検討を行った結果、ランダムではない空間パターンが得られた。それらのパターンの一部は従来の研究でも指摘されている気候要因 (Climate-driven) によって説明可能であるが、明らかに人間要因 (Human-driven) と考えられる変動も抽出できた。植生・土地被覆変動の要因解析には気候要因 (Climate-driven) と人間要因 (Human-driven) の両方の視点が必要であり、両者を理解するためには異なる空間スケールから問題を捉える視点が重要であることを示した。また、グローバルデータセットの中に地域の熱収支の変化に関するシグナルも抽出できたことは人間活動の気候への影響を示唆する重要な知見であると考えられる。

キーワード: 植生・土地被覆変動、植生指標、地表面温度、PAL、NOAA/AVHRR

. はじめに
アメリカの気象衛星 NOAA に搭載された AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) によるグローバル植生指標 (GVI) が 1980 年代前半に作成されて以来、

世界の植生分布、植生変動に関する研究が急速に進んだ。例えば、Justice *et al.*(1985)は大陸スケールの植生分類が GVI を用いて可能であることを示し、Tucker *et al.*(1986)は植生活動の季節変化が大気 CO₂濃度と関連していることを示した。また、Justice *et al.*(1985)、Malingreau(1986)は GVI の経時変化を用いることによって農業や旱魃のモニタリングが可能であることを示した。

その後 GVI より空間分解能の高い PAL (Pathfinder Advanced Very High Resolution Radiometer Land data sets) が公開されてからは 10 年スケールの植生変動の実態が明らかにされてきた。例えば、Myneni *et al.*(1997)、Zhou *et al.*(2001) は NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) の変動から明らかにされた北半球における植生活動の活発化が温暖化に伴う生育期間の伸長によることを主張している。Stow *et al.*(2003)は NDVI の値に影響する様々な変動要因に対する検討を行いつつ、アラスカの北極海に面した斜面のツンドラ植生では明らかに NDVI の積算値が増大していることを示した。また、Kawabata *et al.*(2001)、近藤ほか(2002)は気候と植生活動の関係について、大きく水依存と気温依存の植生グループに分かれることを示した。Nemani *et al.*(2003)では気候と植生活動の関係を水・気温・放射制限型の 3 タイプに分けて地図を示した。

このように、地球上の植生は NOAA/AVHRR によるグローバルデータセット作成開始後の 20 年という時間スケールにおける明らかな変動を捉えることができ、その要因についても地域によって説明が可能となっている。例えば、近藤・開発(2003)はモンゴルの草原植生の成長が夏の降水量に依存することを植生指標と気象データの解析から示した。一方、Yu *et al.*

(2003)はゴビ沙漠周辺で温暖化が春季の土壤水分の減少を促し、草原植生の芽生えを遅らせている可能性を示唆している。

これらの変動はほとんどが気候要因によって説明されているが、最近 20 年間は地球の歴史の中で人間活動の地球表層に対するインパクトが最も大きくなった時代でもある。グローバルの視点で浮かび上がってくる変動はグローバルな変動である気候変動による説明が容易であるが、時としてノイズとして扱われかねない変動も地域の視点からは意味のある変動である可能性がある。人間は地域性に順応した活動をしており、その影響はローカルに現れると考えられるからである。

そこで、現在利用が可能となった 20 年スケールの時系列衛星データを用いてグローバルな植生・土地被覆変動を抽出し、グローバルな視点から説明を試みるとともに、ローカルな地域ごとに現れた変動のシグナルを地域の特性に基づいて記載、説明することを試みる。これにより、長期衛星データに表れた植生・土地被覆変動を気候要因と人間要因およびグローバルとローカルの両側面から解釈することが本論の目的である。

． データと手法

1． 使用した衛星データ

NASA(National Aeronautics and Space Administration)の DAAC(Distributed Active Archive Center)が提供する全球 10 日コンポジット AVHRR データセットを利用した (<http://daac.gsfc.nasa.gov>)。元データは 8km 空間分解能のデータであるが、ホームページが提供するツールを用いて空間分解能が 0.1 度の等緯度経度に投影変換を行った。

データは 1981 年 7 月から利用可能であ

るが、年間のデータを利用するために、解析時点で利用可能な 1982 年から 2000 年の 19 年間のデータを投影変換して利用した。以下の解析では PAL(Pathfinder Advanced Very High Resolution Radiometer Land data sets)と呼ぶが、PAL データセットの詳細については James and Kalluri(1994)を参照願いたい。本論では PAL の品質に影響する様々な要因については議論せず、空間的に現れたランダムではないパターンは何らかの現象と対応している可能性があると考え、その要因について検討を行うことにする。

ダウンロードした PAL データは AVHRR のチャンネル 1 (可視)、2 (近赤外)、4、5 (熱赤外) および NDVI が含まれている。データの時間分解能は 10 日であり、各チャンネルごとに年間 36 旬分のデータが存在する。本研究では NDVI はそのまま利用したが、熱赤外の 2 チャンネルからは Price(1984)のスプリットウィンドウ法を用いて地表面温度を求めて解析に使用した。したがって、ある程度の大気の影響は補正できていると考えられる。

2 . 植生・土地被覆の変化抽出の手法

NDVI 及び地表面温度の経時変化から植生および地表面被覆の変動を捉える手法としては複数の手法が考えられる。今回は以下のパラメータに着目し、解析期間の 19 年間のトレンドを検討することにより、グローバルスケールの植生・土地被覆変動抽出を試みた。

手法 1 : NDVI の年間積算値 ($\sum NDVI$)

NDVI の積算値は Goward *et al.*(1985) や Box *et al.*(1989)によってバイオマスと関連することが明らかにされている。そこで、年間の NDVI の積算値を計算した。その際、

植生域と非植生域の閾値としては一般に用いられている NDVI の値である 0.1 を用い、NDVI が 0.1 を下回る時期および画素については非植生域と判断し、計算から除外した。

手法 2 : 最大 NDVI ($NDVI_{max}$)

1972 年のランドサット 1 号打ち上げ以降、植生指標は LAI やバイオマスと対応付けられることは数多くの研究によって検証されている。したがって、ある年の最大 NDVI はその年の植生の最大 LAI あるいは最大バイオマスに対応すると考えられる。そこで、年ごとに NDVI の最大値を抽出し、解析期間の 19 年のトレンドを検討した。なお、同様なパラメータで年間の NDVI の振幅も考えられるが、非植生となる期間を含む地域では下限を植生と非植生の閾値 (ここでは 0.1 とした) とすべきであり、結果として $NDVI_{max}$ と同じになること、年間を通じて植生が存在する地域では振幅をとると前年の影響も含まれてしまうことから $NDVI_{max}$ を検討の対象とした。

手法 3 : NDVI の標準偏差 ($NDVI_{std}$)

このパラメータは年ごとの植生変動が大きいことを意味する。例えば、熱帯林地域で伐採が行われても先駆植生による植生自体の回復は早いことが知られている。森林火災の場合も数年 ~ 10 数年で回復するようである (例えば、堀口ほか、1994)。このような何らかの攪乱を受けている地域では年々の NDVI の変動は大きく、標準偏差が大きくなるはずと考えた。そこで、手法 1 で求めた年間の NDVI の解析期間における標準偏差を求めた。

手法 4 : 地表面温度の年間最大値 (T_{max})

地表面が植生域から草地あるいは裸地に変化すると熱収支が変わり、地表面温度は

上昇する。これは熱収支式からも予想できると同時に、数値モデルによっても検討されている（例えば、Shukla *et al.*, 1990）。ここでは年々の変動を捉えるために、土地被覆変化に敏感なのは年間の最大地表温度と考え、年間 36 旬のデータの中の最大値を抽出して解析に使用した。

手法 5 : Ts-VI 散布図における軌跡の傾き (TRJ)

Nemani and Running(1997)は横軸に NDVI、縦軸に地表温度をとった 2 次元空間で各画素が年間で描く軌跡は土地被覆により異なり、その傾きは森林で小さく、草地で大きいことを示している。そこで、各年の NDVI と地表温度のデータセットを用いて各画素の年間 36 旬分の軌跡に直線を当てはめ、その傾きを出力したデータセットを作成した。森林から草原方向へのセンスの変化は傾きの増大となって現れると考えた。

以上のパラメータの他に考えられる重要なパラメータは生育期間の長さである。この変動に対して Myneni *et al.*(1997)、Zhou *et al.*(2001)は数日～10 数日のオーダーの変動が重要としているが、今回用いたデータは 10 日単位で作成されており、日単位の議論をするには適していない。したがって、ここでは生育期間の長さは検討の対象としなかった。

なお、南半球では季節の進行が北半球とは逆であるが、南半球中高緯度の植生域は北半球と比較して圧倒的に少ないので今回は考慮しなかった。

・結果と考察

1 . グローバルスケールの土地被覆変動

図 1 に各手法による 1982 年から 2000 年の 19 年間のトレンドを示す（ただし、NDVI の標準偏差のみトレンドではない）。解析期間のトレンドを図中の枠内に示した範囲でカラーパレットに割り当て表示している。赤系統が各パラメータの増加、青系統が減少を表す

NDVI のトレンド（図 1 A）において北アメリカ大陸およびユーラシア大陸の北方林分布域、ヨーロッパの増加傾向はすでに多くの論文で発表されているように、気候変動に基づき説明されている。すなわち、温暖化が融雪を早め、植生の生育期間が延びたという説である（Myneni *et al.*, 1997; Zhou *et al.*, 2001）。一方、中国東部やインド半島西部の正のトレンド地域は灌漑農業地域であり、地理的位置からするとこの変動は農業活動による可能性がある。これらの地域は図 1 D に示した Tmax のトレンドではマイナスの傾向にあるように見えるが、灌漑あるいは作物の生産により潜熱フラックスが増加していると考えたと説明が容易である。これは植生、人間の土地利用が 100km スケールの広がりにおいて地表熱収支を変えているということになる。

サヘル、西オーストラリア、アフリカ南部では NDVI の強い正のトレンドがあるが、現時点で理由は不明である。サヘルは世界森林白書(FAO 協会、2002)に記載された FRA2000(Global Forest Resources Assessment 2000, FAO)の結果によると、1990 年から 2000 年の間で森林面積の純減少が大きな地域であった。UNEP(1997)が出版した乾燥地域における土壌劣化の分布図においてもサヘルは劣化の程度が大きい地域となっている。これは NDVI の増加とは矛盾するように思われるが、FRA2000 では西アフリカ地域について「森林外の樹木」となるアグロフォレストリー体系の樹木も重要な資源となるとの記載があり、こ

のような人間活動の効果による可能性もある。もともと砂漠化の定義自体に具体性がないこともあり、衛星データに現れたシグナルの詳細な検討が今後必要であると思われる。

ブラジルも FRA2000 では森林純減少の多かった地域に含まれるが、NDVIのトレンドでは正の地域が多い。この説明として Nemani *et al.*(2003)はアマゾンでは水不足にならない程度の降水量の減少が日射量の増加をもたらし、成長を増進したことによるとしている。この説明が正しいとすると気候要因による植生変動として解釈が可能である。

NDVI の最大値(NDVImax)のトレンド(図1B)は NDVIのトレンド(図1A)と相関が高いように思われるが、両者が一致しない地域も多い。例えば、シベリア北東部では NDVIのトレンドは小さいが、NDVImax のトレンドは正である。これは成長のパターンが変化したことを意味していると思われる。Kondoh and Higuchi(2001)では草地の生育期初期において可視広域の反射輝度の減少が潜熱フラックスの増加と対応していることを示し、近藤ほか(2002)ではポイントバローのツンドラ植生において生育期初期の NDVI の増加と大気 CO₂濃度の減少の相関を明らかにしている。生育期間初期、すなわち成長期における何らかの変動が成長を促す方向に変わったが、生育期間全体における生産量の増加には至らなかったと考えることができる。

NDVI が正のトレンドを持つが、NDVImax では顕著なトレンドが認められない地域は東シベリアの北方林分布域である。これは前述の場合とは逆に、生育期間の増加が生産量の増加を促したが、ピーク時における NDVI (あるいは LAI と見なしでも良いかも知れない)の増加には至らなかったと考えることができる。このような

違いは植物の生育形態、種類等に依ると考えられるがこれも今後の検討課題である。

図1Cの NDVI の標準偏差(NDVIstd)は明瞭な空間パターンを持っている。アジアの熱帯林地域で NDVIstd が大きい、これは森林伐採とその後の回復の繰り返しを意味しているのかも知れない。沿海州のシホテ・アリニ山脈も日本海に沿って NDVIstd が大きい、近年の森林伐採とともに、虫害による森林衰退が問題になっている地域である(上林、1996)。その他の地域については著者の経験からは説明できない地域が多いが、明瞭な空間パターンは何らかのメカニズムを持っていることを示唆している、今後の地域研究の指針としたい。

最大地表面温度(Tmax)のトレンド(図1D)が正である地域は乾燥・半乾燥地域と対応しているように見える。北アメリカ大陸ではメキシコから米国にかけての乾燥地域、アフリカではサハラとナミブ、カラハリ砂漠、さらにアラビア半島、中央アジアの乾燥地域、中国西域から内蒙古にかけての範囲である。地表面温度の上昇は正味放射量が変わらないとすると、顕熱フラックスの増加(同時に潜熱フラックスの減少)を意味するので、植生域から非植生域方向あるいは湿潤から乾燥方向のセンスを持つ変化である。砂漠地域を除くと、中央アジア、四川盆地、タイの中央平原、スマトラ南部、ジャワ島は農業地域あるいは人口密集地域であるので、正のトレンドは人間活動による可能性もある。

Ts-NDVI 面上の軌跡(TRJ)では、沙漠や乾燥地の周辺域のトレンドが正であるように見える(ここで非植生域は白抜き)。ユーラシア大陸中央部や中国内蒙古自治区から河北省北部の地域でトレンドが正であるが、これは植生域が減少する方向の変化を意味している。黄砂のソースはタクラマ

カン沙漠周辺とゴビ沙漠周辺の二カ所が知られているが、90年代以降砂塵観測日数がゴビ沙漠と内モンゴル周辺で急激に増大している(牧田、2003)。砂塵の発生には地表面状態が強く影響するので、衛星データで捉えられた環境変動のシグナルは黄砂現象と関連を持つかも知れないが、今後の検討課題である。

NDVIとTmaxの双方とも正のトレンドを持つ地域があるが、これは植生活動が活発化し、最大地表面温度も高くなったことを意味している。代表的な地域は西オーストラリア、サヘル北部、タイの平原部であるが、これらはすべて乾燥あるいは半乾燥地である。この地域では農業あるいは植林により植生が増えたが、水ストレスを受ける地域であるため、Tmaxは増加したと解釈することも可能と考えられるが、現地調査に基づく検討が必要である。

以上、グローバルスケールのマップ上で各種パラメータのトレンドの解釈を試み、いくつかの知見を得たが、まだ十分とはいえない。これは各トレンドの中にグローバルスケールとローカルスケールの現象の双方が見えており、後者は地域性に大きく影響されるからである。今後もグローバルな視点で変動を認識しながら、個々の地域の変動をその中で位置づけていく努力が必要であろう。

2. 東アジアにおける土地被覆変動地域

植生、土地被覆変動の要因として人間要因を考えると、その出現範囲は地域的に限定されざるを得ない。グローバルな視点で説明困難な変動も、ローカルスケールで地域性を考慮に入れて検討して説明できれば、人間要因の変動の重要性を明らかにしたことになる。そこで、東アジアを対象にして、これまでの経験で予想可能ないくつ

かの地域を選定して、各手法に現れた変動の説明を試みた。

1) 黄河中流灌漑地域(図2)

図2には黄河が蘭州から北上し、逆U字型に南下する範囲を示した。フォールカラー画像(図2A)の緑は植生を表し、銀川、臨河、包頭付近の黄河の水を利用した大灌漑区の範囲が明瞭に識別できる。この地域はNDVIのトレンド(図2B)でも正の地域として認めることができる。その地域はまた図2EにおいてTmaxが低下した地域とおおむね一致している。このことは灌漑農業による導水によって熱収支が変化し、すなわち潜熱フラックスが増加し、顕熱フラックスが減少したことを意味する。このような変化が認められる地域の空間スケールは10~100kmであり、けっして小さな面積ではない。このような地域の熱収支の10年スケールの変化を衛星データで捉えることができた点は、土地利用変化の気候への影響を考察する際の重要な知見であると思われる。

NDVIとNDVIMaxのトレンドはおおむね一致しているように見えるが、これは植生の生育パターンに大きな変化がないことを意味しており、農業生産の増加により各トレンドの説明が可能であることを示唆している。NDVIMaxの解釈は難しいが、植生量とともに人口の増加する東南部が大きいことは何らかの人間活動の反映である可能性もある。一方、TRJは北西部の乾燥地域が大きい(白抜きの部分是非植生域)。乾燥地域における人間活動の影響の大きさを示唆しているのかも知れない。

このように人間要因の植生・土地被覆変化をPALは明瞭に捉えている。十分とはいえない点もあるが、ローカルスケールで見ることによって解釈が可能になった好例と考えられる。

2) 燕山山地 (図3 上部)

北京の北方に位置し、長城を載せる燕山山地は近年の中国政府の政策によって水土保持のための植林が進められている地域である。図3 Aのフォールスカラー画像では上部の緑が濃い地域に対応する。実際に、燕山山地を横切る八達嶺高速道路からは等高線上に配列された植樹のパターンをよく観察することができる。

この地域の NDVI のトレンドは正であり (図3 B)、近年の植林の効果が現れてきたと解釈することも可能である。一方、北京の水瓶の一つである密雲ダム (北京の北東約 80km に位置する) は燕山山地を流域とするが、流入量は近年減少傾向にあり、首都北京への水供給に対する不安要因となっている。森林からの蒸散がダムの流入量減少の原因だとすると、水資源の観点からは負の効果を持つことになる。しかし、近年の森林水文学の成果はまず土壌保全を優先させるべきで、その後に植生の調節による水保全の段階が来ることを教えている (塚本、1998)。燕山山脈の現況は過渡期に相当し、十分な土壌保全が施された後に、水保全が可能となる段階がくると考えられるが、この事例は粗いグローバルデータセットであるにも関わらず、20年スケールの時系列の中に地域の水文現象認識に役立つ情報が含まれていることを示している。

3) 華北平原 (図3 下部)

この地域は中国の穀倉地帯であり、近年食糧生産量の伸びは著しいが、同時に地下水位低下の問題も引き起こしている地域である (近藤ほか、2001)。金子ほか (2004) によると食糧生産量の東西分布は大きく異なり、西側で大きく東側で低い。しかし、生産量の伸び自体は平原東部で大きいことがわかっており、実際に NDVI のトレ

ンドは東部で大きい。このことは人間要因による植生変動 (ここでは農業活動) が衛星データに記録されていることを意味している。これは典型的な人間要因 (Human-driven) の植生変動である。なお、河北省東部では黄河から導水した水の灌漑利用が認められていないが、黄河最下流に位置する山東省では特例的に認められている。黄河口付近の正の NDVI のトレンドはこのような政策の影響を受けている可能性もある。

結論

1982年からのデータセットを利用可能な NOAA/AVHRR データを用いて全球スケールの植生変動解析を行った。変動を抽出するために NDVI の年間積算値 (NDVI)、年間最大 NDVI (NDVImax)、NDVI の標準偏差 (NDVistd)、年間最大地表温度 (Tmax)、Ts-VI 空間における軌跡の傾き (TRJ)、の5つのパラメータについて 1982年から2000年の19年間のトレンド (NDVistd を除く) の検討を行った結果、ランダムではない空間パターンが得られた。

グローバルスケールの検討では従来多くの研究がある北方林の植生活動の活発化を再確認したが、気候要因 (Climate-driven) だけでは説明できない変動も抽出できた。これらの一部は明らかに農業活動によるものであった。このような人間要因の変動は地域性に支配されるため、その理解にはローカルの視点が重要である。そこで、東アジアの3地域を例として抽出し、これまでに得られている経験に基づいて解釈を試みたところうまく説明することができた。このことから人間要因 (Human-driven) の変動がグローバルスケールにおいても重要であることを示した。また、近年生産量を増加さ

せている農業地域では Tmax の低下傾向を認めることができた。その範囲は数 100km のオーダーにおよぶものであり、人間活動がけっして狭域ではない範囲の熱収支を変えつつある現状を認識することができた。

植生・土地被覆変動の要因解析には気候要因 (Climate-driven) と人間要因 (Human-driven) の両方の視点が必要であり、両者を理解するためには異なる空間スケールから問題を捉える視点が重要である。本研究は今後アジア地域を含む世界の環境変動をモニタリングし、総合的な観点から現象を理解するためのボトムアップアプローチのフレームワークとして実施したものである。グローバル解析の成果で一見ノイズと見えるシグナルもローカルの視点からは重要なシグナルである可能性があり、それらを集積することによって地球環境の変動を総合的に認識することが可能となると考えられる。

謝辞

地球環境変動の研究にはグローバルデータセットが不可欠であるが、その作成は多大な労力と信念が必要とされる。本論で利用した PAL を作成した NOAA/GSFC の DAAC を維持・管理するスタッフには多大な感謝の意を表したい。

引用文献

Box, E. O., Holben, B. N., and Kalb, V. (1989) : Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetatio*, **80**, 71-89.

Yu, F., Kevin P. Price, James Ellis, Peijun Shi (2003): Response of seasonal vegetation development to climatic variation in

eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment*, **87**, 42-54.

Goward, S. N., Tucker, C. J., and Dye, D. G. (1985) : North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. *Vegetatio*, **64**, 3-14:

Nemani, R. and Running, S.(1997): Land Cover Characterization using Multitemporal Red, Near-IR, and Thermal-IR Data from NOAA/AVHRR. *Ecological Applications*, **7**(1), 79-90.

James, M. E. and Kalluri, S. N. V. (1994): The Pathfinder AVHRR Land data set: An improved coarse-resolution data set for terrestrial monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, **15**, 3347-3364.

Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Holben, B. N., and Tucker, C. J.(1985): Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. of Remote Sensing*, **6**, 1271-1318.

Kawabata, A., Ichii, K. and Yamaguchi, Y. (2001): Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing*, **22**, 1377-1382.

Kondoh, A. and Higuchi, A.(2001) : Relationship between satellite-derived spectral brightness and evapotranspiration from a grassland. *Hydrological Processes*, **15**, 1761-1770.

Malingreau, J. P.(1986):Global vegetation dynamics: satellite observations over Asia. *International Journal of Remote Sensing*, **7**, 1121-1146.

Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G., and Nemani, R. R.(1997): Increased plant growth in the northern high

- latitudes from 1981-1991. *Nature*, **386**, 698-702.
- Myneni, R. B., Tucker, C. J., Asrar, G., and Keeling, C. D.(1998) : Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 6145-6160.
- Price, C. J.(1984):Land surface temperature measurement from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High resolution Radiometer. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 7231-7237.
- Shukla, J., Nobre, C., and Sellers, P.(1990): Amazon deforestation and climate change. *Science*, **247**, 1322-1325.
- Stow, D., Daeschner, S. Hope, A., Douglas, D., Petersen, A., Myneni, R., Zhou, L., Oechel, W.(2003): Variability of the Seasonally Integrated Normalized Difference Vegetation Index Across the North Slope of Alaska in the 1990s. *International Journal of Remote Sensing*, **24**(5), 111-1117.
- Tucker, C. J., Townshend, J. R. G., and Goff, T. E.(1985) : African land cover classification using satellite data. *Science*, **227**,369-375.
- Tucker, C. J., Fung, I. Y., Keeling, C. D., Gammon, R. H.(1986): Relationships between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index. *Nature*, **319**, 195-199.
- Zhou, L., Tucker, C. J., Kaufmann, R. K., Slayback, D., Shabanov, N. V., and Myneni, R. B.(2001) : Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, **106**, D17, 20069-20083.
- UNEP(1997) : *World Atlas of Desertification*. Arnold, London, 192pp.
- FAO 協会 (翻訳・発行)、国連食糧農業機関 (FAO) 編集 (2002) : 世界森林白書 (2001 年報告)、農文協、331pp.
- 金子紫延、近藤昭彦、沈彦俊、唐常源、佐倉保夫(2004) : 中国華北平原における水循環・食糧生産・人間活動の関連性に関する研究 . 水文・水資源学会誌 (投稿中)
- 上林徳久(1996) : 北方林モニタリング . RESTEC、**38**、32-34
- 近藤昭彦・田中正・唐常源・佐倉保夫・嶋田純・芝野博文・劉昌明・張万軍・胡春勝・劉小京・陳建耀・沈彦俊(2001) : 中国華北平原の水問題 . 水文・水資源学会誌、**14**、376 - 387 .
- 近藤昭彦・建石隆太郎・ルンツヌウ エレオノラ・朴鐘杰(2002) : 植生活動と気候変動、大気 CO₂ 濃度との関係 . 水文・水資源学会誌、**15**(2)、128-138.
- 塚本良則(1998) : 森林・水・土の保全 - 湿润変動帯の水文地形学 . 朝倉書店、138pp.
- 堀口郁夫、劉大力、谷宏、町村尚(1994) : NOAA/AVHRR データによる森林火災地の植生指数と地表面温度による回復状況の解析 . 日本リモートセンシング学会誌、**14**(2)、14-23.
- 牧田広道(2003) : 気候変動のシグナルとしての黄砂研究 . 沙漠研究、**13**(1)、7-21.

図のキャプション

図 1 1982 年から 2000 年間のパラメータのトレンド . A:年間の NDVI の積算値(NDVI)、B:年間の最大 NDVI(NDVImax)、C: NDVI の標準偏差(NDVIstd)、D:年間最大地表温度(Tmax)、E:Ts-NDVI 空間における年間の軌跡の傾き (TRJ) .

Figure 1 Trend of parameters from 1982 to 2000. A:Annual integrated NDVI(NDVI), B:Annual Maximum NDVI(NADImax), C:Standard deviation of NDVI(NDVIstd), D:Annual maximum surface temperature(Tmax), E:Annual trajectory in the Ts-NDVI space(TRJ).

図 2 黄河中流域における各パラメータのトレンドの分布 . 範囲は北緯 42 ~ 33 度、東経 103 ~ 113 度 . A : 2000 年 8 月中旬のフォールスカラー画像、B: NDVI、C:NDVImax、D:NDVIstd、E:Tmax、F:TRJ . カラーパレットは図 1 と同じ .

Figure 2 Distribution of trends of parameters in the middle reach of the Yellow River. Areal extent is in latitude between 33 to 42°N, and in longitude between 103 to 113°E. A:False color image in the middle of August in 2000, B: NDVI, C:NDVImax, D:NDVIstd, E:Tmax. F:TRJ. Color palette is the same as Figure 1.

図 3 中国、華北平原における各パラメータの 19 年間トレンドの分布 . 範囲は北緯 43 ~ 34 度、東経 112 ~ 122 度 . A : 2000 年 8 月中旬のフォールスカラー画像、B: NDVI、C:NDVImax、D:NDVIstd、E:Tmax、F:TRJ . カラーパレットは図 1 と同じ .

Figure 3 Distribution of trends of parameters in the North China Plain. Areal extent is in latitude between 34 to 43°N, and in longitude between 112 to 122°E. A:False color image in the middle of August in 2000, B: NDVI, C:NDVImax, D:NDVIstd, E:Tmax. F:TRJ. Color palette is the same as Figure 1.

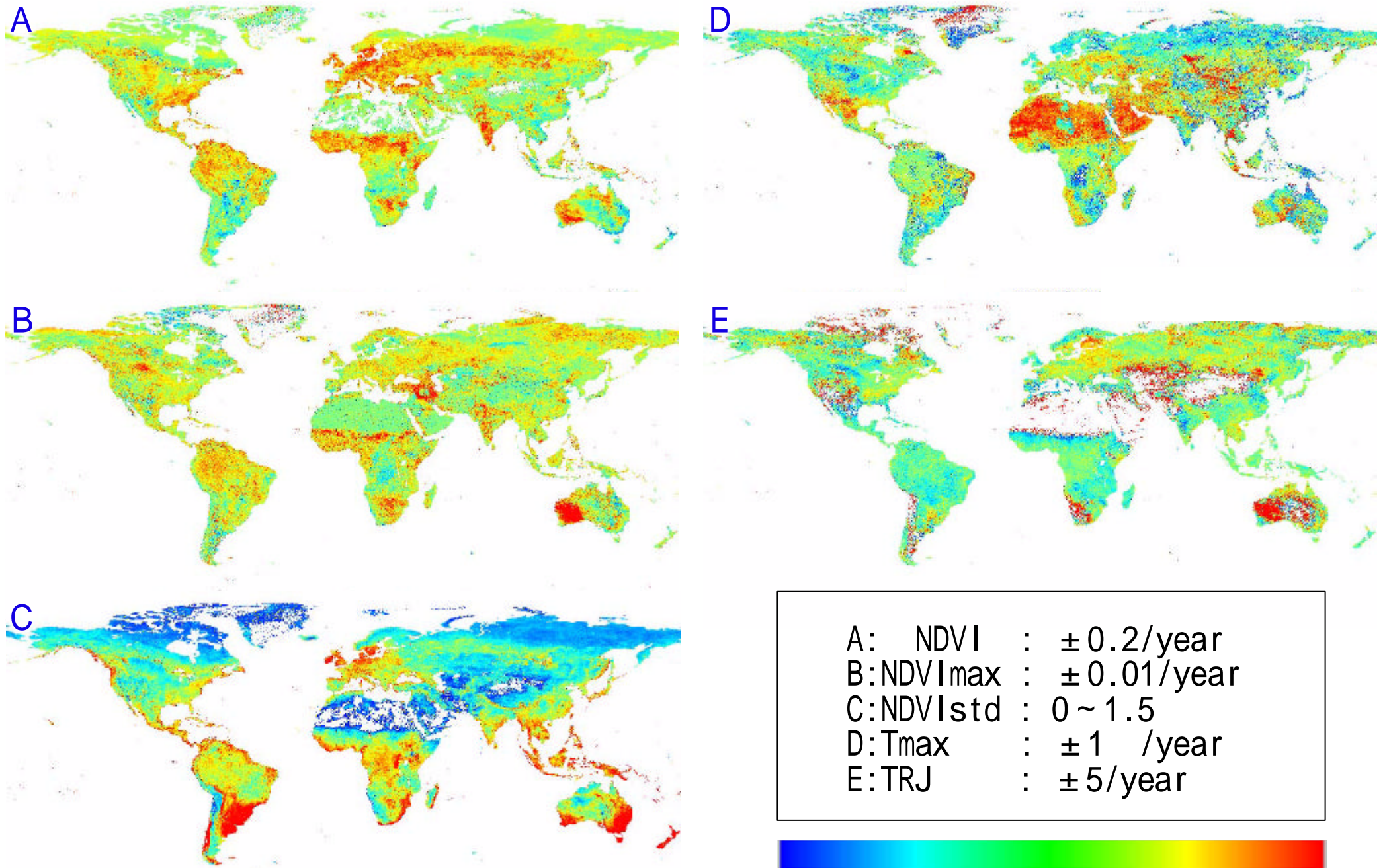


図1 1982年から2000年間のパラメータのトレンド。A:年間のNDVIの積算値(NDVI)、B:年間の最大NDVI(NDVImax)、C: NDVIの標準偏差(NDVlst)、D:年間最大地表面温度(Tmax)、E:Ts-NDVI空間における年間の軌跡の傾き(TRJ)。

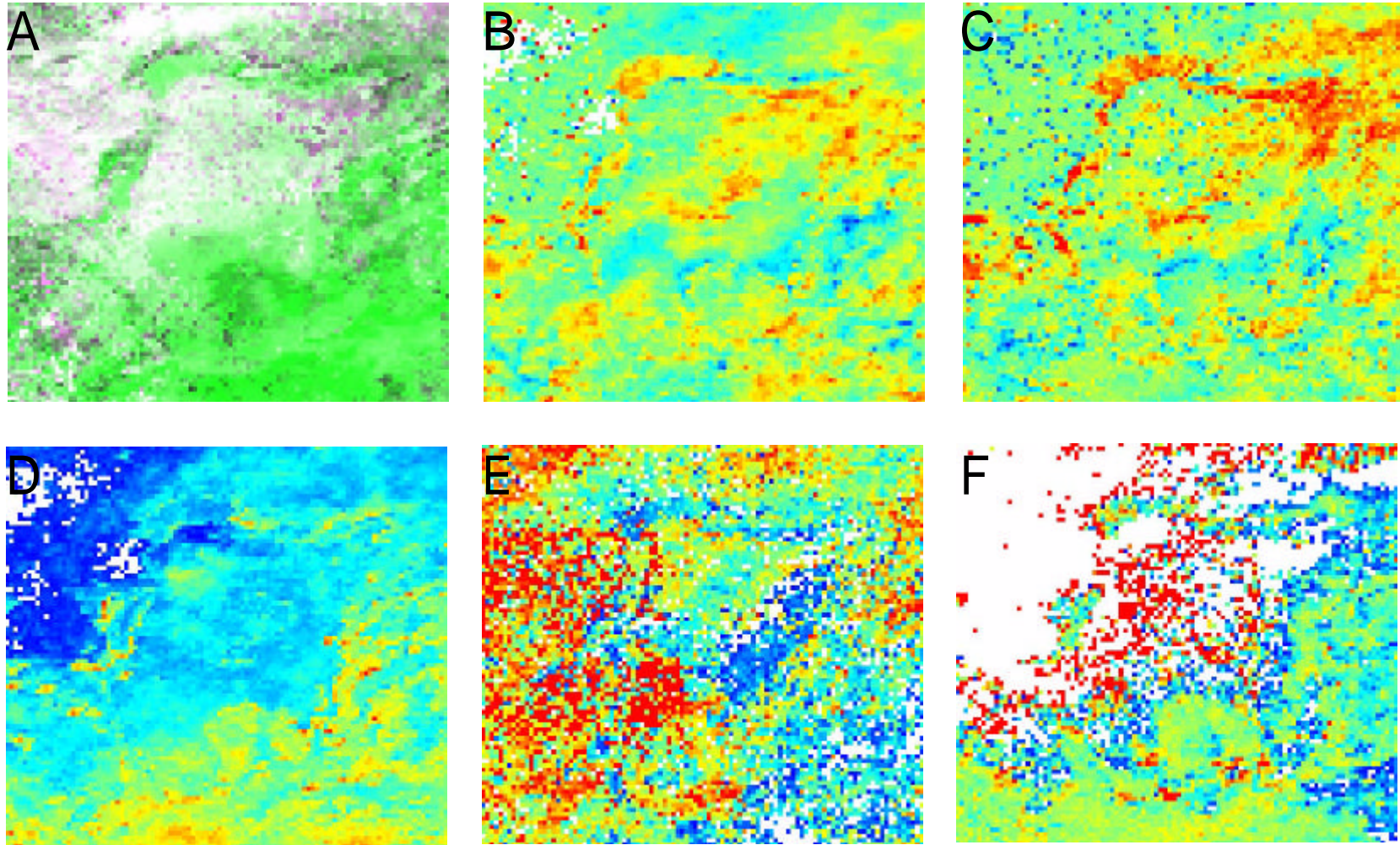


図2 黄河中流域における各パラメータの19年間トレンドの分布 .範囲は北緯42 ~ 33度、東経103 ~ 113度 .A 2000年8月中旬のフォールスカラー画像、B: NDVI、C:NDVImax、D:NDVlst、E:Tmax、F:TRJ .カラーパレットは図1と同じ.

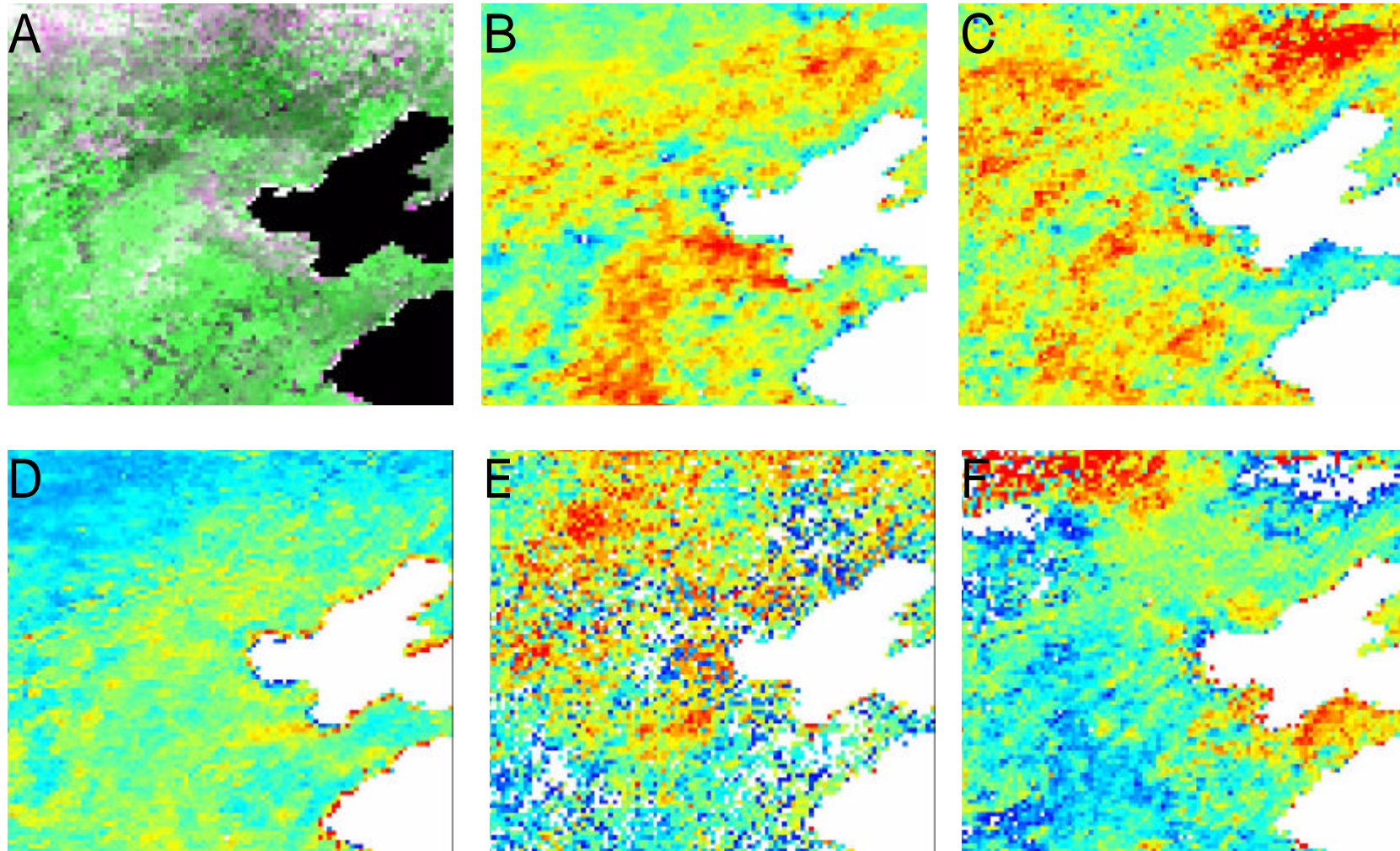


図3 中国、華北平原における各パラメータの19年間トレンドの分布 .範囲は北緯43
 ~34度、東経112~122度 .A 2000年8月中旬のフォールスカラー画像、B: NDVI、
 C:NDVImax、D:NDVlst、E:Tmax、F:TRJ .カラーパレットは図1と同じ.