

# 北アフリカにおける天水農地の分布と雨季の降水量・可能蒸 発散量の関連性

誌名	ランドスケープ研究
ISSN	13408984
巻/号	635
掲載ページ	p. 535-538
発行年月	2000年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



# 北アフリカにおける天水農地の分布と雨季の降水量・可能蒸発散量の関連性

Relationship between Spatial Distribution of Rainfed Cropland and Precipitation / Potential Evapotranspiration in Rainy Season in North Africa

立入 郁\*

Kaoru TACHIIRI

摘要：天水農業を行うには年降水量で夏雨地域では350mm、冬雨地域では200mm前後が必要だとされる。本研究の目的は、天水農地の雨季の降水量と可能蒸発散量の関係を用いて一般的に適用できる農耕の限界水文条件を示すことにある。解析は北アフリカにおける月別降水量、月別可能蒸発散量（Penman - Monteith 式を使用）および土地被覆に関する既存のデータセットを用いて行った。本研究では、1年で降水が最も安定となる連続する3ヵ月を雨季と定義し、解析対象とした。本研究の結果、夏雨地域・冬雨地域を問わず、雨季の降水量と可能蒸発散量の比が0.58以上となることが耕作が可能である条件として示された。

## 1. はじめに

土地環境を規定する要因は一般に気温、降水量などの気象条件のほか、地形、土壌、植生などといわれ、これらと人間の土地利用の相互作用の結果がランドスケープとしてあらわれる。

例えばアジアでは、土地環境要因のうち大陸スケールで見れば第一のファクタとして降水量、第二のファクタとして気温の影響が大きく、他の要素の寄与を大きく引き離している（立入ら、1997）<sup>5)</sup>。これは土壌、植生が大域的には気候条件から決まるという従来の知見とも一致している。降水量・温度といった、連続した数で表せる気候条件のわずかな違いが、土壌、植生の質的な違いを生み、土地環境を全く異なったものへと変えてしまうのである。

ここで人間の土地利用の仕方もまた、同様なことが言える場合がある。その代表的な例が、乾燥地における農耕から牧畜への変化である。一般に農耕と牧畜の両方が可能な地域では、第一次生産者の植物に直接依存する農耕の方が、第二次生産者の草食獣に依存する牧畜よりも効率が良い（丹野、1995）<sup>6)</sup>とされ、また牧畜民の多くは遊動を行うのに対し、農耕民の多くは定住生活を行うなど、その生活様式には大きな差異が半ば必然的に生まれ、文化の違いをも引き起こす。

歴史的に乾燥地科学がもっとも進んで来たサヘル（サハラ砂漠南縁地域）においても、降水量の多い順にギニア、スーダン、サヘル、サハラというように大きく区分され（図1）、さらに細かく分ける場合にはギニア-スーダンやスーダン-サヘルなどの名称を用いる。こうした地域区分は一意的ではなく、その目的によって区分の仕方は異なる場合があるが、主に年間降水量によってなされることが多い。World Bank (1985)<sup>8)</sup> は、唯一、Sahelo-Saharan 地域と Sahelian 地域の境界だけを、年間降水量ではなく N.L.C (Northern Limit of Cultivation) を用いたものにしていく。

World Bank (1985)<sup>8)</sup> によれば、農耕の北方限界はサヘルでは年間降水量 200mm と同 350mm の間に存在するが、地域によって 200mm 線に近づく地域と 350mm 線に近づく地域とがある。これは勿論、年間の雨の降り方が地域によって異なるために起こる現象である。

本研究は、既存のデータセットを用い、降水量と可能蒸発散量 (potential evapotranspiration, 以下 PET) との関係を用いて、農耕の限界を定める水文条件を調べることを目的としている。こうした条件は、従来は通年の降水量などで考察されることが多

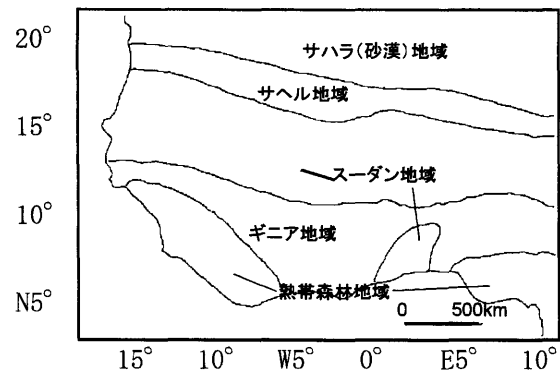


図-1 気候帯による西アフリカの地域区分の例（廣瀬・若槻 1987<sup>8)</sup> を一部改変）

かったが、本研究では、農耕が行われている時期以外の寄与は小さいと考え、雨季のみを扱った。

解析にあたっては、①土地利用データをあまり粗いものにしてしまうと、小規模の土地利用が抽出できず、解析の意味が薄れること、②データ量があまりに巨大になると解析手法が制約され、手続きが非常に煩雑になりまた結果も図示が困難であること、からグローバルスケールの解析をあきらめざるを得なかった。そこで、①冬雨地域と夏雨地域を含む地域を選定することにより、年降水量のみの考察との違いが顕著になること、②乾燥地を比率として多く含むこと、③筆者が湿潤地域から乾燥地域まで予察のために横断したことがあるため解析結果の吟味がし易いこと、などを考慮して北アフリカを対象とした。

なお PET とは、水不足の起こっていない地表からの蒸発量であり、植物による蒸散などの効果も含む。Penman (1948)<sup>3)</sup> の定義では、「日陰にある丈の低い草本が十分に水を与えられた場合の最大蒸発量」だとされた。

## 2. 対象地の概要と研究方法

### (1) 対象地の概要

研究対象地域はサハラ周辺の半乾燥地域を多く含む北アフリカとした。具体的にはケニア、ウガンダ、中央アフリカ、カメルーン

\* 日本学術振興会特別研究員、筑波大学歴史・人類学系

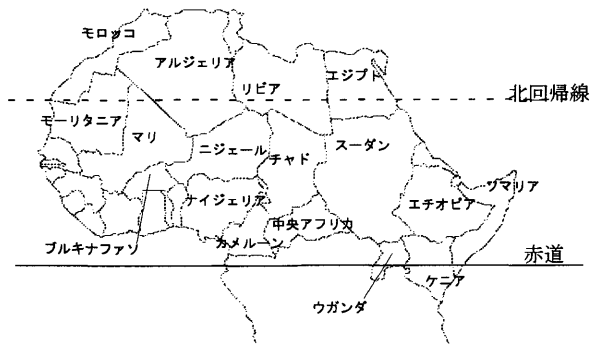


図-2 解析対象地域  
(国名は主なもののみ)

ンおよびそれら以北のアフリカ諸国(島嶼部は除く)である(図2)。サハラおよびその周辺の乾燥地に加え、エチオピアからケニア北部につながる乾燥地も本研究の対象地域に含まれる。サハラ砂漠はその東部や西部においては大洋に直接接するため半乾燥地などが存在しないが、北部と南部(サヘル)においては連続的に湿潤な地域へと移行し、乾燥から湿潤への変化の中でランドスケープと人間の生活が移り変わっていく様子を考察するのに非常に適した地域となっている。既存のデータを用いる場合にはとくに、空間解像度が問題になることが多く、大陸スケールで乾から湿への変化がみられるこの地域は、本研究の研究手法の適用にとくに適した地域でもある。また、サハルの夏雨地域(図3a)の農耕の北方限界と地中海側の冬雨地域(図3b)における農耕の南方限界を統一論に論じることはこれまでほとんどなされてこなかった。

(2) 用いたデータセット

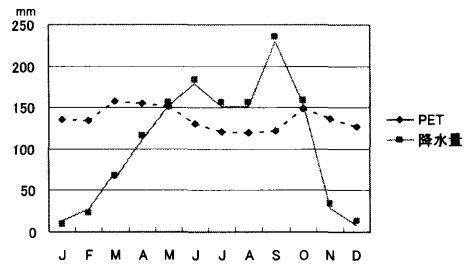
本研究では、オンライン上で取得できるデータを複数組み合わせることで、大陸スケールの考察をおこなった。用いたデータベースは、降水量に関してはニコルソンのアフリカ降水量データセットである。これはNCAR(The National Center for Atmospheric Research)のサイトである <http://www.scd.ucar.edu/dss/catalogs/index.html> で入手可能である。PETに関しては、NASA(米国航空宇宙局)のサイトである <http://hydro4.gsfc.nasa.gov/STAFF/ChoudhuryBJ/pmpotevap.html> からアクセス可能なChoudhury(1997)<sup>11)</sup>の月別可能蒸発散量データセットを用いた。

このデータセットは、PETの算出にPenman-Monteith(P-M)式を用いて1987年および1988年の月別PETを算出している。同式は以下のような形をしている。

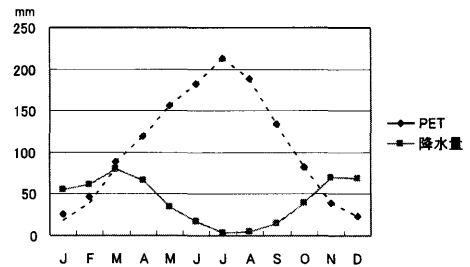
$$E_0 = \frac{\Delta R_{ni} + \rho c_p D / (r_s + r_e)}{\Delta + \gamma(r_s + r_e) / r_e} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta$ : 飽和水蒸気圧曲線の傾き(hPa/K)、 $\gamma$ : 乾湿計定数(hPa/K)、 $R_{ni}$ : 有効放射量(mm)、 $\rho$ : 大気圧、 $c_p$ : 大気の熱容量(295K、1000hPaのとき $\rho c_p = 1.2 \times 10^{-3} \text{ MJK}^{-1} \text{ m}^{-3}$ )、 $D$ : 飽差(hPa)、 $r_s$ : 表面抵抗(sm<sup>-1</sup>)、 $r_H$ : 熱の移動に対する空力抵抗(sm<sup>-1</sup>)、 $r_e$ : 熱の移動に対する有効抵抗(sm<sup>-1</sup>)を指す。

Choudhury(1997)<sup>11)</sup>はアルベド=0.23、 $r_s=70$ (sm<sup>-1</sup>)を、水の十分な草地の代表値として採用して $R_{ni}$ を計算し、太陽放射および雲量はISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project、空間解像度2.5°×2.5°)のデータを使用している。気温、蒸気圧、飽差はNOAA/TOVSの衛星データを用いて推定し、また空力抵抗決定のために、4DDA(four-dimensional data assimilation) procedure(Schubert et



(a) 夏雨地域のPET, 降水量変化の例



(b) 冬雨地域のPET, 降水量変化の例

図-3 夏雨地域と冬雨地域の水ストレスの季節変化の違い  
本研究で用いたデータより作成。(a): 0°N3°付近、  
(b): W6°N33°付近

al., 1993)<sup>11)</sup>のデータを用いている。

土地被覆に関してはUSGSのFTPサイト(edcftp.cr.usgs.gov)で得られるAfrica Seasonal Land Cover Regions Legend v1.2データセットを用いた。これは1992年4月から1993年3月のNOAA/AVHRRのデータをもとに約1km四方の空間解像度で土地被覆をサバンナ、草地、耕地など197のカテゴリに分類したものである。

ニコルソンのデータセットは、欠損している月もいくらか見られるが、1875年から1984年までの全アフリカ1000ヶ所以上の毎月の降水量が集めてある。このうち本研究の解析対象地域内では544のステーションのデータが使用可能であった。同データセットの月別平均降水量を用い、TIN(triangulated irregular network)とよばれる手法により、12ヶ月それぞれについて、北アフリカ全域をカバーする面的データを作成した。TINとは、データの存在するステーションを結んで三角形を作り、その中にある点の推定値を三角形の頂点のデータから求める手法である。Tiessen法もしくはVoronoi法といわれる手法が、観測値と観測値の中間の値を定義できない場合(たとえば植生図や土壤図などの質的データ)の内挿に適しているのに対し、数値で表されるデータが連続的に変化する場合には、連続する関数を用いるTINの方が精度の点で優れている。サハラの南北では海岸部に向けて連続的に降水量が大きくなるため、ここではTINを用いることとした。

つぎにこうして求めた面的データをPETのデータに合わせて一辺0.5度のグリッドセルを基本単位としてラスタ化した。

(3) 解析手法

本研究では、戸刈・菅(1963)<sup>7)</sup>やAgrhymet(ニジェールの農業気象研究機関)の研究者らの報告・意見をふまえ、3ヶ月を穀物生産に必要な期間の代表値として採用し、もっとも降水に恵まれる連続する3ヶ月間をその場所の「雨季」として、その期間のみを解析対象とした。

つぎに土地被覆分類でcropland(耕地)もしくはcroplandとほかの土地被覆のモザイクだと分類された地域について、雨季中の累計降水量と累計PETを調べ、これらの量を図上にプロットし、その分布特性を考察した。累計PET計算の際には1987

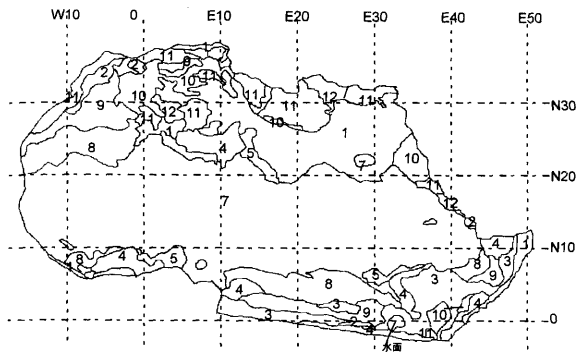


図-4 雨季の分布  
数字は雨季の最初の月を示す

年の推定値と1988年の推定値の平均を用いた。用いた土地被覆データセットには灌漑農地のカテゴリも存在するが、本研究では天水農地の分布を研究対象にしたため、解析から除外した。

ここで降水量（以下P）およびPETのデータセットは地理座標系（緯度経度座標系）であったのに対し、土地被覆分類データセットはランベルト正積方位図法で作成されていたため、座標系の変換の後、データのリサンプリングを行った。

このときの空間解像度は、データ配布時の約1km×1kmという空間解像度を考慮し、0.01°×0.01°とした。これは降水量などの空間解像度（0.5°）とは大きな差があるが、ここでは面積最大のカテゴリでそのメッシュの性質を代表させるなどのリサンプリングは、土地被覆の情報を減らし、また歪めると考え、行わなかった。

### 3. 結果

対象地域内の雨季の分布を図4に示す。サハラ以南では5～9月、サハラ以北では10～3月に雨季となるところが多い。サハラおよびサヘルでは、7～9月に雨季となる。研究対象地域はごく一部を除いて北半球に位置するため、これらはそのまま夏（高温期）および冬（低温期）に対応する。さらに一般に高緯度地方ほど夏冬の温度差が大きくなるため、冬雨地域の雨季の蒸発散量はかなり抑えられる（図3a）。

対象地域内で雨季のP/PETの比を横軸に、天水農地の面積比をとったものを図5に示す。図ではP/PET比を0.1刻みで示している。天水農地の面積率はP/PET=1.4～1.5で最大値を取り、P/PET>1.8では面積率が20%以下に下がる。また、P<PETの領域についてさらに詳しく見たものが図6である。この図では0.01刻みで図化している。図6から、P/PET=約0.6以上になると急激に天水農地が増えていることがわかる。厳密にはP/PET=0.58で初めて天水農地が10%を越えるため、この値を閾

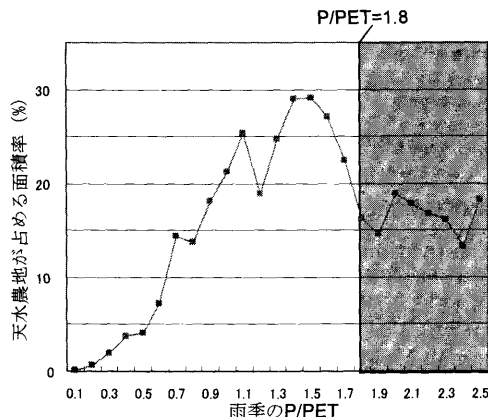


図-5 北アフリカにおける雨季中のP/PETと天水農地の面積率との関係（巾0.1ごとに算出）

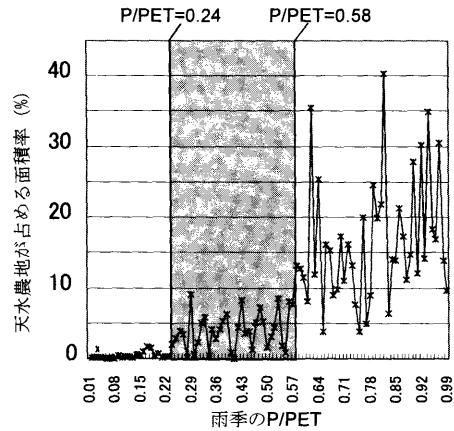


図-6 北アフリカで雨季に $0 < P < PET$ となる地域におけるP/PETと天水農地の面積率との関係（0.01ごとに算出）

値とする。またもう一つ、P/PET=0.2以下ではほとんど天水農地がみられなくなる。ここでは1%未満が3回以上連続しなくなるP/PET=0.24を閾値とした。

天水農地における雨季中のPとPETの関係をプロットしたものが図7である。この図には図5と図6から得られた3つの閾値を示す $P=0.58PET$ 、 $P=0.24PET$ 、 $P=1.8PET$ に加えYoshida (1981)<sup>9)</sup>がイネの生育に必要なとした $P=PET$ を表す直線が書きこんである。

図7でPET=400mm弱に固まったサンプルはギニア湾沿岸からサヘルにかけての夏雨地域に分布するcroplandを示し、PET=200mm前後の塊はサハラ以北の冬雨地域のものである。

年間降水量による限界条件が夏雨地域と冬雨地域で大きく異なるのに対し、ここで示した $P/PET \geq 0.58$ という条件は、両地域に普遍的に適用できることがわかる。

### 4. 考察

対象地域全体の年降水量と年PETの関係を図8に示す。ばらつきは大きいものの、年降水量が小さいところで年PETが大きくなるという傾向が現われている。これは主に、乾燥していることで飽差が大きくなり、P-M式の分子の第2項が大きくなることに起因する。

図7において、P/PETの小さい領域にもいくつかのサンプルが存在するが、これはこの領域の土地環境を持つ地域がそもそも多いこと、およびこのような地域でも微地形・微気象などの効果で天水農業が可能な場所が少数ではあるが存在していることを示している。

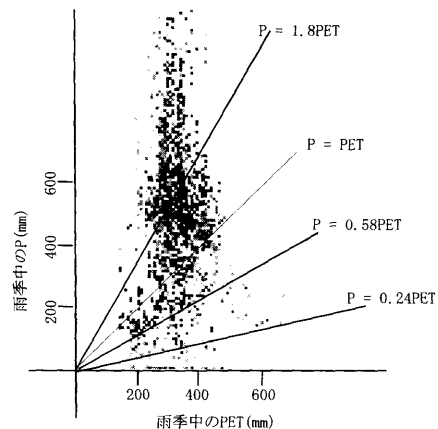


図-7 天水農地における雨季中の可能蒸発散量（PET）と降水量（P）の関係

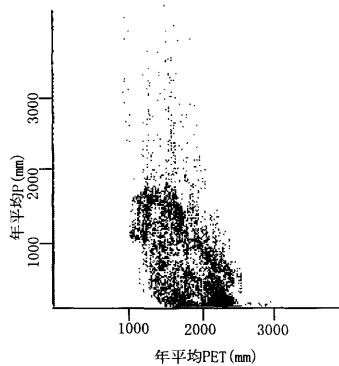


図-8 北アフリカにおける年可能蒸発量(PET)と年降水量(P)の関係(PETはP-M式による推定値)

しかし、対象地域においては最も顕著な閾値は  $P/PET=0.58$  である。また、Yoshida (1981)<sup>9)</sup> は  $P < PET$  となる月がしばしば現われることを、天水栽培地におけるイネ生産の不安定性の主な理由として挙げている。このことから、サヘル地域などで栽培されているミレットやソルガムといった植物がイネよりも乾燥に強いために、 $0.58 \leq P/PET < 1$  の地域でも生育できると考えられる。

図5、図6から得られた  $P/PET=0.24, 0.58, 1.8$  という閾値を用いて、北アフリカにおける雨季のPとPETの比の分布を調べると図9のようになった。 $P/PET \geq 0.58$  の地域はいわば「耕作可能地域」を指すものである。地中海側には  $P/PET \geq 0.58$  となる地域は非常に狭い範囲に限られている。これに対し、ギニア湾沿岸からスーダン、エチオピアにかけて  $P/PET \geq 0.58$  となる地域が広く分布しており、これらの地域の多くは7～9月を雨季とする(図4)。

図9から、地中海沿岸地域は砂漠から耕作可能地への変化が急激であるということもいえる。 $0.24 \leq P/PET \leq 0.58$  の地域が非常に狭いからである。これに対しサヘルや東アフリカにおいてはこのような地域が砂漠と耕作可能地域との間に広がっており、降水量などの変化で生物生産の量が大きく振幅するリスクの大きい地域とも言える。このような条件も、早くから国際社会の注目を集めてきた理由の一つだろう。

また冬雨地域と夏雨地域の違いとして、図3aにおいては降水量変動の方がPETの変動よりも卓越しているのに対し、図3b



図-9 北アフリカにおける P/PET の分布

においてはPETの変動の方が大きい、という点も興味深い。さらに、図3aのようにギニア湾沿岸地域の多くでは、農耕適期が長く続くため二期作などもおこなわれている。

他方、ナイル川の河口付近などで行われている灌漑農業は当然別に限界条件を論じられるべきであろう。

#### おわりに

サハラ砂漠およびその周辺の乾燥地を含む北アフリカにおいて、既存のデータセットを用いて、農耕可能性を決定する水文条件について調べた。その結果、夏雨地域、冬雨地域を問わず、降水が最も安定している時期の降水量と同時期の可能蒸発量の比が0.58以上となるのが、耕作が可能であることの条件として提示できた。

また、この他に0.24や1.80といった値も、閾値として意味がある。前者はほとんど農耕が不可能な地域と、微地形・微気象などで可能になりうる地域を分ける値と考えられる。一方後者は水が過剰になったりあるいは熱帯雨林が覆っていたりして水は豊富だが農地の面積率が減って小さくなることを特徴づける値である。

なお、FAOや現地の研究機関では作物生育期間(LGP: length of growing period)がしばしば農業気象条件を評価するのに用いられる。今後はこうした指標との関連なども考察していきたいと考えている。

本研究は文部省科学研究費(課題番号11410084, 国10041001, 奨励06840)の成果の一部である。

#### 引用文献

- 1) Choudhury, B. J. (1997): Global pattern of potential evapotranspiration calculated from the Penman-Monteith Equation using satellite and assimilated data: *Remote Sens. Environ.* 61, 64-81.
- 2) 廣瀬昌平・若月利之(1987): 西アフリカ・サバンナの生態環境の修復と農村の再生: 農林統計協会, 東京, 484pp
- 3) Penman, H. L. (1948): Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass, *Proc. Roy. Soc. London*, A193, 120-146.
- 4) Schubert, S. D., Pfaendtner, J. and Rood, R. (1993): An assimilated data set for Earth science applications: *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 74, 2331-2342.
- 5) 立入 郁・恒川篤史・武内和彦(1997): 環境特性に基づくアジア地域の土地分類と耕作強度・土壌荒廃パターンとの関連性: 第11回環境情報科学論文集, 69-74
- 6) 丹野 正(1995): 活動と生業適応—狩猟採集・農耕・牧畜 in 「生態人類学を学ぶ人のために」: pp18-41, 世界思想社, 京都
- 7) 戸刈義次・菅六郎(1963): 食用作物: 養賢堂, 東京, 512pp.
- 8) World Bank (1985): *Desertification in the Sahelian and Sudanian Zones of West Africa*, Washington, D.C., 60pp.
- 9) Yoshida, S. (1981): *Fundamentals of rice crop science: The International Rice Research Institute*, Manila: 村山登・吉田よし子・長谷川周一・末永一博 共訳「稲作科学の基礎」, 博友社, 東京, 316pp.

**Summary**: Cultivation demands 300 - 350 mm of annual precipitation in summer-rained area, while some 200 mm is enough in winter-rained area.

The objective of this study is to clarify the hydrological condition of cultivation in North Africa by investigating the relationship between precipitation and potential evapotranspiration during rainy season, defined as the most stable continuous three months in rainfall in this study.

Analysis was conducted using preexisting datasets of precipitation, potential evapotranspiration and land cover, all of which are accessible through internet.

The dataset of potential evapotranspiration was derived by the Penman-Monteith equation with parameters from remotely sensed data by NOAA/TOVS and observation at meteorological stations.

The condition, available both in summer-rained and winter-rained area, of cultivation is that the ratio of precipitation to potential evapotranspiration exceeds 0.58 in rainy season.

Apart from 0.58, 0.24 and 1.80 are also significant thresholds. The former is related to the effect of micro-topography or micro-climate, while the latter to the surplus of water.