

変動する閾値を用いた火星のダスト ストームの年々変動の再現実験: Mulholland et al. (2013) のレビュー

Mulholland et al (2013): Simulating the
interannual variability of major dust
storms on Mars using variable lifting
thresholds, *Icarus*, 223, 344-358

荻原 弘堯 (北大・理)

火星のダスト

- 常に大気中に存在
 - 大気加熱源
- 季節変動と年々変動を示す
 - $L_s=180^\circ \sim 330^\circ$ に光学的深さが大きくなる
 - グローバルダストストーム (GDS)
 - 全球規模
 - $L_s = 250^\circ \pm 60^\circ$ に発生する
 - だいたい3年ごとに1度

以前までのモデル

- ダスト輸送過程
 - ダスト巻き上げ
 - 鉛直混合
 - 移流
 - 重力沈降
- GCM
 - Neman et al. (2002), Basu et al. (2006), Kahre et al. (2008)
 - ダストの季節変動はある程度表現できたが GDS は表現しきれしていない

ダスト巻き上げパラメタリゼーション

- 風応力によるダスト巻き上げ
 - グリッドスケールの巻き上げ
 - 風応力が閾値を超えた時に巻き上げる
 - いろいろなサイズのダストストームの原因と考えられる
- ダストデビルによるダスト巻き上げ
 - サブグリッドスケールの対流による巻き上げ
 - 対流を熱エンジンと仮定してパラメタライズ
 - 背景場のダストを維持していると考えられる

GDS の表現

- 大きな閾値を用いることで GDS をある程度表現
 - 一度 GDS が起こると別の年には GDS が起こらなくなる (Kahre et al., 2005)
 - 地表面ダストが有限とする
 - 観測された GDS よりも遅く始まり, 終わるのも遅かった (Basu et al., 2006)
 - 地表面ダストは無限に存在する)

この論文の目的

- 最新の風応力によるダスト巻き上げパラメタリゼーションに地表面ダストの枯渇効果を加えない場合と比べてみる
- GDS の再現実験をし, 開始時期と終了時期を観測されたものに近づける

モデル

- UK MGCM (UK version of the Martian Global Climate Model)
 - プリミティブ方程式系
 - 水平離散化にはスペクトル法
 - 移流
 - セミラグランジェ移流スキーム
 - 風応力によるダスト巻き上げ
 - 後述
 - ダストデビルによるダスト巻き上げ
 - 対流熱エンジンパラメタリゼーション (Rennó et al., 1998)
- 水平解像度
 - T31

一定の閾値の風応力によるダスト巻き上げパラメタリゼーション

$$F(u_*) = \alpha_N \cdot \max \left[0, 0.25 \frac{\rho}{g} (u_*)^3 \left(1 - \left(\frac{u_*^t}{u_*} \right) \right) \left(7.0 + 50.0 \left(\frac{u_*^t}{u_*} \right)^2 \right) \right]$$

α_N : 効率因子, ρ : 大気密度, g : 重力加速度, u_*^t : 摩擦速度の閾値, u_* : 摩擦速度

- Kok and Renno (2008)
- 一定の閾値は T31 の計算に合わせるように設定

$$\zeta^t = \rho (u_*^t)^2 = 0.020 [Pa]$$

ζ^t : 応力閾値

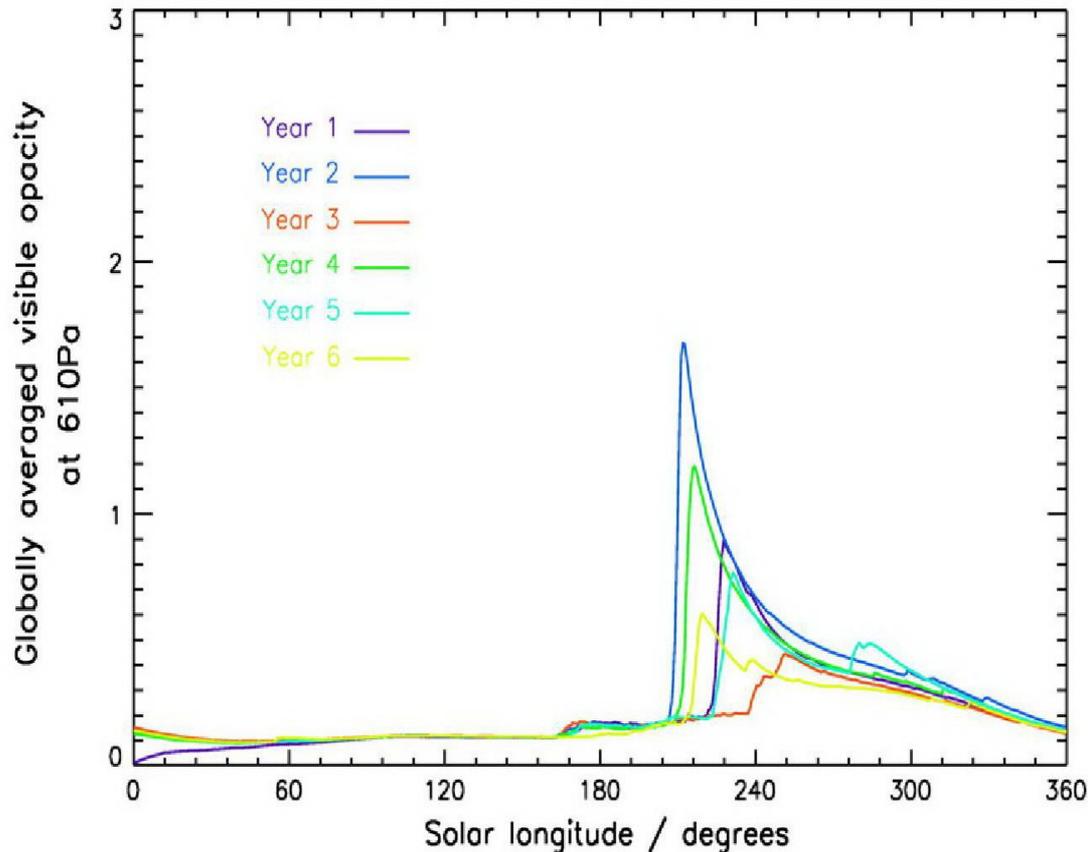
– Shao and Lu (2000) から求められる理論式に風洞実験の結果を当てはめて求めた

変動する閾値を用いた風応力による ダスト巻き上げパラメタリゼーション

- ダストフラックスに地表面ダスト密度の変化に合わせたダスト増加/減少率 ζ_{inc}^t を掛けて応力閾値を計算
- 一定の閾値で用いた応力閾値を最低値とする
- ダストの「再補給」 ζ_{dec}^t を応力閾値に追加する
 - ダスト輸送は北向きに偏り, ダストストームの停止を防ぐ

一定の閾値の結果

610 Pa の全球平均した可視の光学的深さ

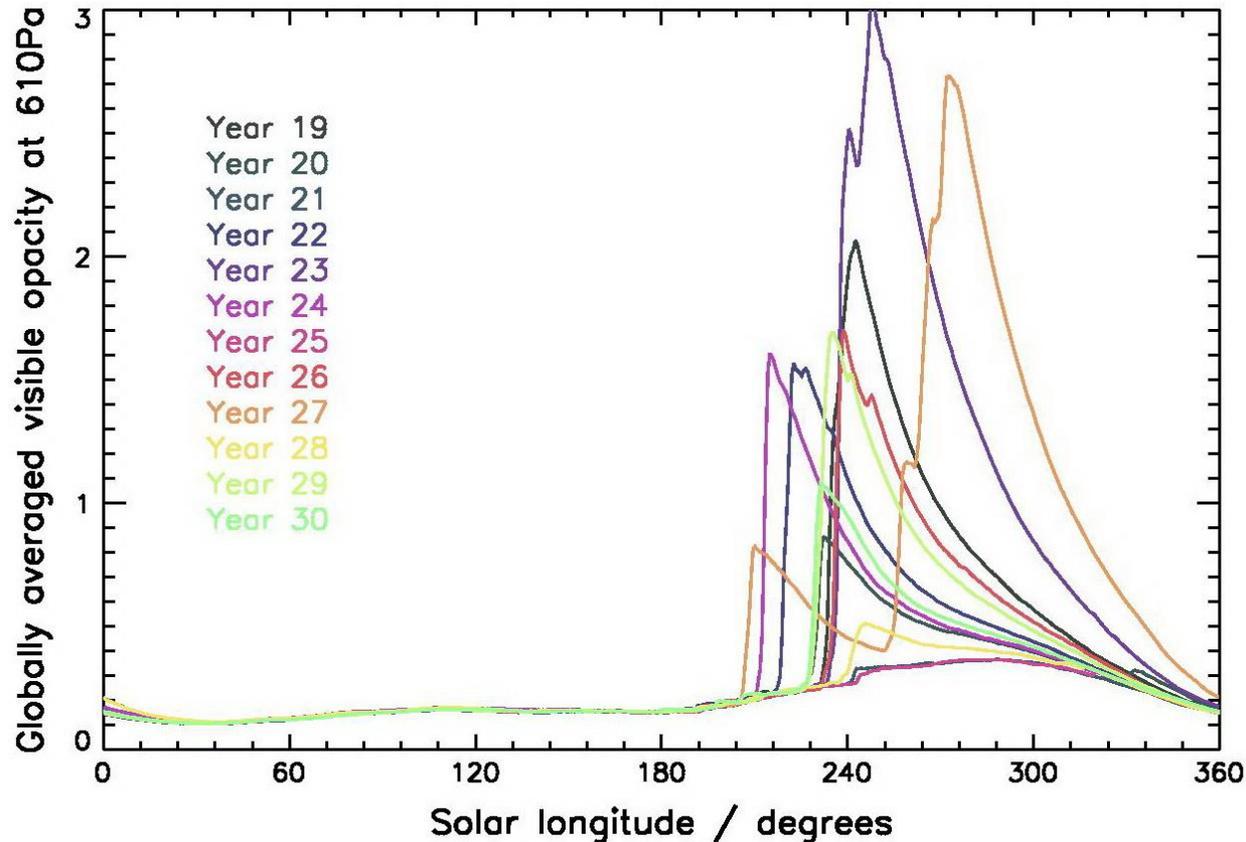


- 主に $L_s = 210 - 240^\circ$ の時にダストストームが形成
- $L_s = 240^\circ$ よりも後の時期に形成されない
- 光学的深さが2を超えるものはない。

- $\alpha_N = 1.4 \times 10^{-4} [1/m]$

変動する閾値の結果

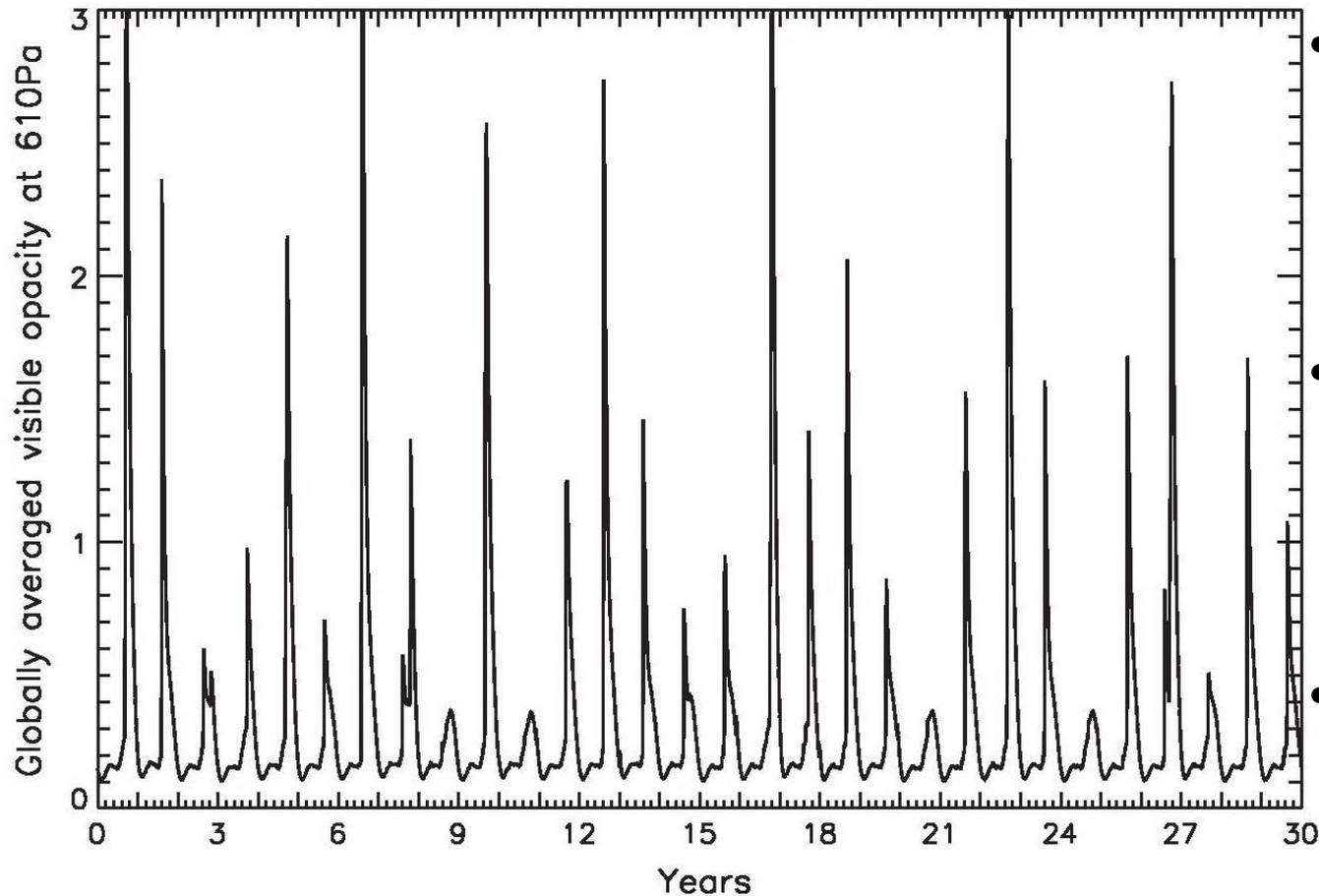
610 Pa の全球平均した可視の光学



- ダストストームの大きさのピーク値と開始位置が大きくなった
- $Ls=205-280$ の域に始まった
- 光学的深さが 2 を超えるものがある

- $\alpha_N = 4 \times 10^{-4} [1/m]$, $\zeta_{inc}^t = 0.5 [1/Pa]$, $\zeta_{dec}^t = 10^{10} [Pa/s]$

変動する閾値の結果 全球平均光学的深さの年ごとの変化



- 大きな光学的深さを持つストームは続いて発生しない。
- 光学的深さのピークは前年のストームの大きさに依存する
- GDS がだいたい3年に1度起きている

Fig. 4. Globally averaged visible optical depth over a period of 30 model years.

2年続けてのダストストームの発生の様子

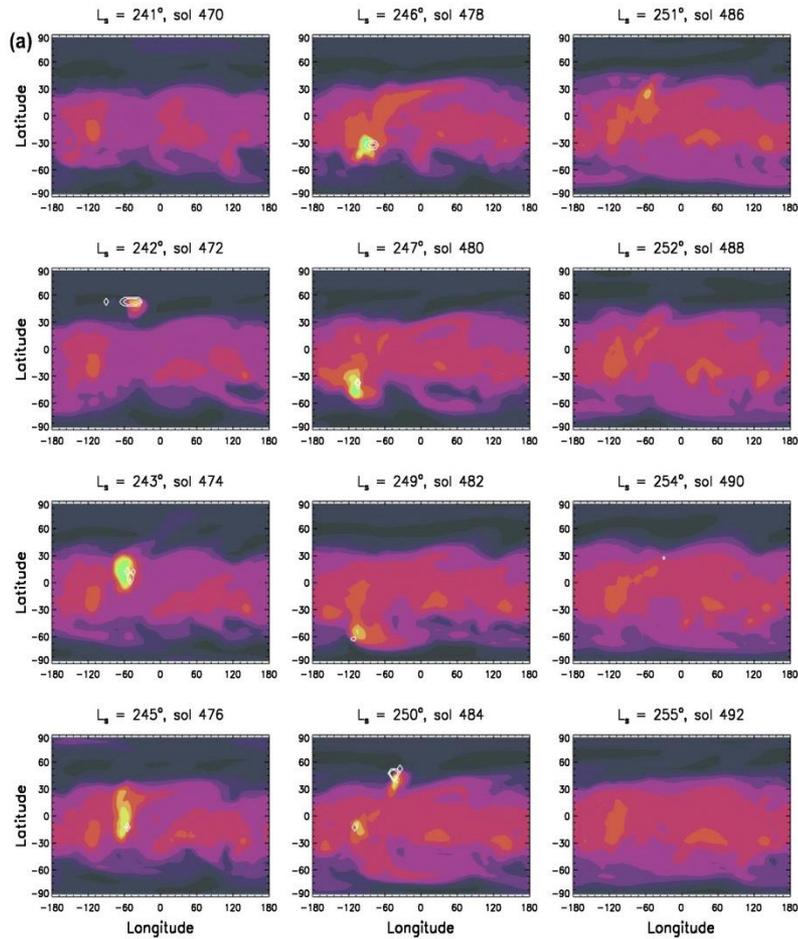


Fig. 7. Progression in 610 Pa dust opacity from two successive years of the longer simulation. White contours mark where wind stress dust lifting is occurring, with contour levels of $(10^{-8}, 10^{-7}) \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

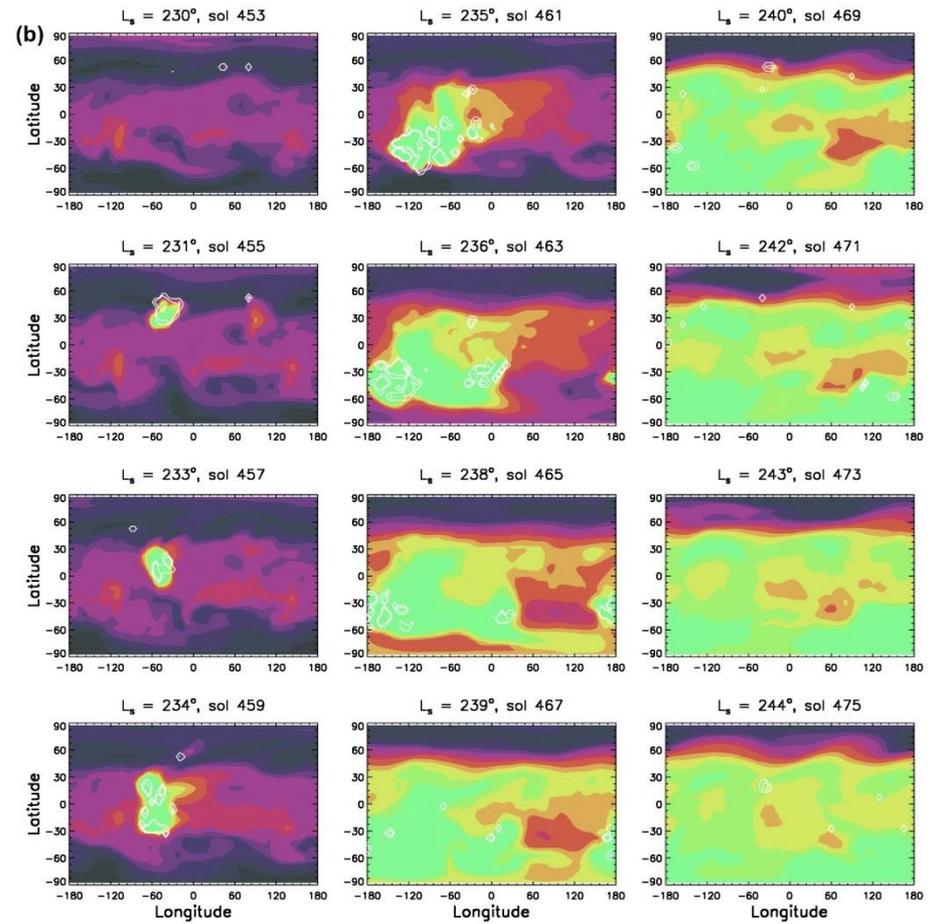
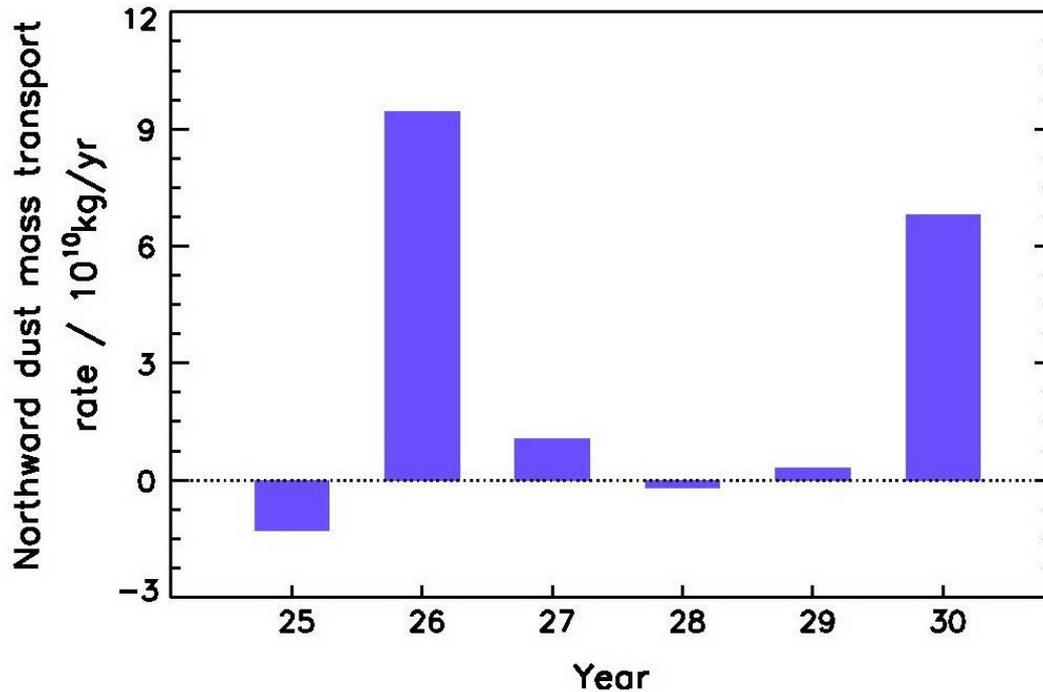


Fig. 7. (continued)

風応力による巻き上げの南半球から 北半球への正味のダスト輸送率



- 総合的に言えば北向きが大きい
- 南半球でダストの補給が必要になる

結論

- 変動する閾値を用いて, ダストストームの年々変動と開始時期を観測に近いものを表現
- このモデルでの問題点
 - 南半球から GDS が発生しない.
 - ただし, 北半球からの発生したダストストームが広がってできる
 - モデル内で GDS と他のダストストームの区別がついていないようである
 - さらにメソスケールでの地形を表現できていないようである
 - $L_s=240^\circ$ 以降での GDS が作れない
 - 再供給項
 - 人工的に追加しないと極端にダストが少ない領域ができてしまう
 - 何らかの解釈が必要

感想

- 結局実用的な意味しかない再補給項を加えることで GDS に近い表現を出しているようなので、あまり妥当性があるとは思えない。

参考文献

- Basu et al (2006): Simulation of spontaneous and variable global dust storms with the GFDL Mars GCM. J. Geophys. Res. (Planets) 111 (E10). <http://dx.doi.org/10.1029/2005JE002660>, 9004–+
- Kahre et al (2005): Simulating the martian dust cycle with a finite surface dust reservoir. Geophys. Res. Lett. 32 (October). <http://dx.doi.org/10.1029/2005GL023495>, 20204–+.
- Kahre et al (2008): Investigations of the variability of dust particle sizes in the martian atmosphere using the NASA Ames General Circulation Model. Icarus 195 (June), 576–597. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2008.01.023>.
- Kok and Renno (2008): Electrostatics in wind-blown sand. Phys. Rev. Lett. 100(1). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.014501>, 014501–+.
- Mulholland et al (2013): Simulating the interannual variability of major dust storms on Mars using variable lifting thresholds, Icarus, 223, 344-358
- Newman et al (2002a): Modeling the martian dust cycle: 1. Representations of dust transport processes. J. Geophys. Res. (Planets) 107 (December). <http://dx.doi.org/10.1029/2002JE001910>
- Rennó et al (1998): A simple thermodynamical theory for dust devils. J. Atmos. Sci. 55 (November), 3244–3252. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1998\)055<3244:ASTTFD>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1998)055<3244:ASTTFD>2.0.CO;2).
- Shao, Y., Lu, H., 2000. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. J. Geophys. Res. 105 (September), 22437–22444. <http://dx.doi.org/10.1029/2000JD900304>