

生態系モデルを用いた異なる立地特性における砂漠化プロセスの差異に関する研究

Model Study on Desertification Process varying with different geographical conditions

岡安 智生¹・佐々木 雄大¹・Undarmaa JAMSRAN^{2*}・武内 和彦¹

Tomoo OKAYASU, Takehiro SASAKI, Undarmaa JAMSRAN and Kazuhiko TAKEUCHI

要旨：本研究では、モンゴル国で見られた立地特性により異なる砂漠化プロセスを例に取り、生態系モデルと風食モデルをカップリングさせることで、立地条件の違いによる成立植生の差異を、過放牧に対する応答の差異も含めて単一のモデルで再現することを試みた。その結果、土性の違いが風食等の差異を生み、質的に明確に異なる砂漠化プロセスを再現することができた。植生機能タイプによる根の鉛直分布の差異の除去、もしくは風食の影響の除去をした状態でのシミュレーションを行ったところ、現象は再現できず、両要因が今回行った例を再現するのに不可欠であることがわかった。

キーワード：砂漠化、生態系モデル、立地特性、風食

Abstract : In this study the simulation of the establishment of different vegetation types as well as different responses to grazing pressure was conducted, using a single model which coupled the ecosystem model and wind erosion model, and by using the results of a field survey in Mongolia as an example. It was successfully simulated that the difference in soil texture led to different physical characteristics such as wind erosion intensities. By testing the simulation condition without the difference of root distribution with plant functional types, and without wind erosion impact, the example could not be simulated. Thus it was found that both factors are essential for the simulation.

Key Words : desertification, ecosystem model, geographical condition, wind erosion

はじめに

世界の乾燥・半乾燥地域では人為活動による砂漠化が問題となっており、過放牧が主な原因であるとされている (Dregne *et al.*, 1991)。生態系モデルは、様々な攪乱の生態系への影響の評価手段を与え、自然資源管理のための意思決定に貢献し得る (Argen *et al.*, 1991) 点から、活発に研究されている。その砂漠化研究への応用において、過放牧により草原に灌木が侵入する現象が目目され、多数のモデルが適用されている (Weber *et al.*, 1998; Gao and Reynolds, 2003; Sparrow *et al.*, 1997)。しかし灌木侵入の例だけに留まらず、砂漠化による生態系の応答は多様である (Vesk and Westoby, 2001)。そこで、既往の生態系モデルは単一の立地の過放牧に対する生態系の応答を対象とするのに対し、本研究はモンゴル国でのフィールド調査で得られた複数の砂漠化のタイプを例に取り、立地条件の違いによる成立植生の差異を、過放牧に対する応答の差異も含めて単一のモデルで再現することを試み、再現の鍵となる要因を特定することを目的とした。

形単位ごとに、水場や冬季キャンプ等の重放牧地点からの放牧圧傾度に対する植生の応答を調査した。植生機能タイプごとに植物体積 (被覆率×高さ) にを整理すると、2つのパターンに分類できることが分かった (図 1)。一方では、軽放牧時に高嗜好性草本が優占し、重放牧地点では低嗜好性草本が現れ植生量が増加した。もう一方では灌木が優占し、放牧圧の増加とともに植生量が減少した。

両パターンの立地の主たる相違として、土性の違いが指摘された。前者では土性が相対的に細かく、地表にクラストが発達し砂漠補石が見られるのに対し、後者においては土性が粗く、灌木周辺に厚い風積砂層が見られるなど、活発な風食活動が見られた。このように、立地により植生の差異が見られる上、放牧圧に対する反応も明瞭に異なった。以上の差異をまとめて表 1 に示した。

1. 2 モデル

既往の生態系モデルでは植生機能タイプの変化は、主に土壌水分の垂直分布が要因だと説明されている (Sala *et al.*, 1997)。そこで、そうしたプロセスを再現できる生態系モデルを用いるとともに、灌木周辺の風積砂の例から風食も重要な役割を持つと考えられるので、生態系モデルと風食モデルをカップリングすることとした。

1) 生態系モデル

1. 研究の方法

1. 1 対象とする現象

佐々木ら (未発表) は、モンゴル国中央戈壁県マンダゴビ周辺、および南戈壁県ブルガン周辺において、地

東京大学大学院 農学生命科学研究科 生態システム学専攻
モンゴル国立農業大学 生態系研究センター

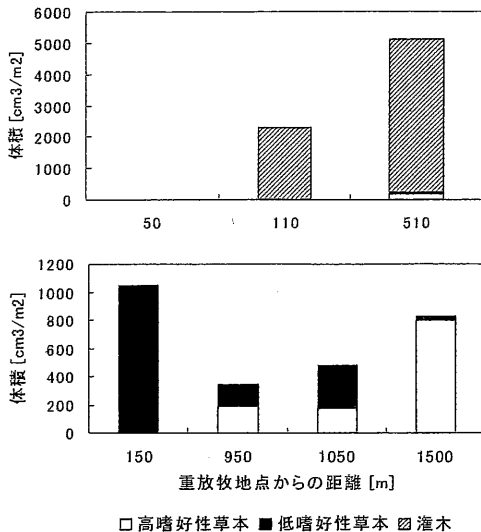


図1 重放牧地点からの距離に対する植生機能タイプごとの体積(被度×高さ)の2つの例。

表1 放牧に対する植生の変化の差異と土性との関係

参照記号	放牧圧増大に対する植生の変化	土性
O1	灌木の急減	砂土
O2	高嗜好性草本 ⇒低嗜好性草本	砂壤土, 壤土

既往の生態系モデルで、複数の植生機能タイプを扱うものから、適切なものを選定した。風食モデルとカップリングすることから、発展方程式の形 ($dx/dt=f(x)$) で書かれていて、現象の再現に不可欠な要因を特定するために、明示的な要因のみで構成されていることを条件とした。仕様が公開されているもの (Gao and Reynolds, 2003; Sparrow *et al.*, 1997; Weber *et al.*, 1998) を精査した結果、Mosaic Arid Land Simulator (MALS; Gao and Reynolds, 2003) のみが条件を満たすことがわかったため、本研究ではMALSを用いた。MALSは、様々な環境条件における、植物の各器官のバイオマス変動や異なる種類の繁殖等を明示的に扱う詳細なモデルである。放牧地への応用のために、多種類の植生機能タイプの動態や競争を考慮していることに特徴がある。MALSは非常に詳細なモデルであるため、以下の通り簡略化を行った。以下に主要な式のみを示した。詳細は Gao and Reynolds (2003), Kemp *et al.* (1997) を参照されたい。

まず葉、茎、根、種子ごとのバイオマス配分等のパラメータ設定の困難さから、部位ごとのダイナミクスは排除した。さらに空間変数を除去した。すなわち

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = A_i + d_i W_i - p_i g G - q Q$$

と単純化される。ただし放牧および風食の影響を表す項を追加した。ここで W : 現存量, A : 同化率, d : 減少率, i : 植生機能タイプ (1:高嗜好性草本, 2:低嗜好性草本, 3:灌木), p : 嗜好性係数, g : 放牧影響係数, G : 放牧量, q : 風食影響係数, Q : 風食量である。土壤水分については、MALSは簡便な多層バケツモデルを含んでおり、本研究では Gao and Reynolds (2003) および Kemp *et al.* (1997) の枠組みをそのまま用いた。放牧圧の影響は Sparrow *et al.* (1997) に従った。

2) 風食モデル

本研究では、自然・半自然草地を対象とし、近年活発に用いられている Wind Erosion Assessment Model (WEAM; Shao, 2000) を用いた。WEAMは、植物、土壤水分、礫などの地表面の状態に対して、どの程度、風による土壤侵食が発生するかを推定する。特に改変なく用いたため、詳細は割愛する。風食量は大気中の土壌粒子へのせん断力の指標である摩擦速度(u)と、土壌粒子が地表面に留まろうとする力の指標である限界摩擦速度(u_c)から算出される。摩擦速度は風速および表面粗度から計算される。限界摩擦速度は、理想状態の限界摩擦速度に土壤水分や粗度要素等により補正される。

3) 風食の植物への影響

植物による風食量への変化の研究は多いが、逆に風食による植物の被害を調べた論文は見られなかったため、最も単純に、植生機能タイプに関わらず $q = \text{定数}$ とした。

1. 3 パラメータの整備

以上のモデルに対して、下記のようにパラメータを設定した。気象データは、本研究が対象とした地点の一つであるモンゴル国中央ゴビ県マンダルゴビの1994年から2005年のデータをインターネットより入手した。植物生理のデータは、既往文献等から広く収集した。今回対象にした植物種は高嗜好性草本が *Stipa krylovii*、低嗜好性草本が *Peganum nigellastrum*、灌木が *Caragana microphylla* であったが、同じ植物種について一通り揃うデータは存在しなかったため、同じ属で同様の生理生態特性を持つ種のデータで代用した。

灌木については *C. intermedia* の調査データを用いた (Gao *et al.*, 2004; Xiao *et al.*, 2005)。高嗜好性草本は *S. grandis* (Chen *et al.*, 2005a; Chen *et al.*, 2005b; 陳 *et al.*, 2000) および *S. tenacissima* のデータ (Haase *et al.*, 1999) を用いた。当該地域の非嗜好性の代表種である *Peganum nigellastrum* には、調査データは類似するものもなかったため、同じように放牧で高嗜好性草本が低嗜好性草本に置き換わる現象からそれぞれの種の成長量を測定した Moretto and Distel (1997) より類推した。

表2 本研究で用いた主なパラメータ。a_i, b_i, c_i は、式 A.3 (Gao and Reynolds, 2003) の炭素同化率推定式の係数。

	低嗜好性 草本	高嗜好性 草本	灌木
炭素同化係数 a _i	11.03	14.7	20.71
炭素同化係数 b _i	0.23	0.23	1.25
炭素同化係数 c _i	-	-	2.18
減少率 d _i	1.78	1.78	2.21
比葉面積	13.00	13.00	190.00
葉重比	3.90	3.90	70.00
放牧影響係数 g	0.10		
風食影響係数 q	2×10 ⁻⁵		

長量が高嗜好性草本の 2/3 になるよう調整した。

現地の土壌調査で根の鉛直分布を調べた結果、草本の根は地表からほぼ 20 cm 以内、灌木についてはおよそ 10~60cm の範囲で分布していた。そこで、それぞれの範囲に均等に分布すると仮定し、これを再現できる最少の土壌層の構成 0-10cm, 10-20cm, 20-60cm を設定した。

対象地の土性は、灌木域で砂土、草本域では砂埴壤土と壤土であった。そこで、シミュレーションはそれらの土性を含む砂土、砂壤土、壤土、砂埴壤土の 4 地点を設定した。風食の植物への影響を定量的に示した文献は見られなかったため、Li *et al.* (2005) の、植被率が 2% 前後の流動砂丘上では風食量が約 36 [mg/m²/s] という結果から、その風食量で植生量が 0 になるよう試行を繰り返しパラメータを決定した。嗜好性は、高嗜好性草本を 1、低嗜好性草本を 0 とした。灌木は冬季のみ喫食されるため、ここでは簡単に、4 つの季節の内 1 つでのみ喫食されることから、0.25 と設定した。放牧影響係数 g は、放牧圧を上げて（または下げて）変化しなくなるまでの全範囲をカバーするようシミュレーションを試行しながら設定した。設定された主なパラメータを表 2 に示す。

1. 4 数値実験の条件

シミュレーションは、4 種類の土性と、6 段階の放牧強度の組み合わせの 24 種類を設定した。設定された放牧強度に対応する被食量と、農林水産省農林水産技術会議事務局編 (1996) より羊の一日の喫食量を 2 kg とした場合の放牧圧の概算を、表 3 に示した。まず初期値の依存性を減少させるため、仮の初期値を与えてシミュレーションを開始し、1994 年から 2005 年の気象データを 10 回繰り返して入力した後、準定常状態に達するのを確認した。その状態からさらに 10 回繰り返して、各変数についてその時間平均を取った。また、本研究で、現象の再現に重要であると仮定した要因を除去した状態（植生機能タイプごとの根の鉛直分布の差異がない状態、および風食がない状態）でのシミュレーションを行った。

表3 設定した 6 段階の放牧強度の概算値

放牧圧	被食量 [kg/ha/day]	概算放牧強度 [頭/ha]
重放牧	150.29	75.15
↑ ↓	78.80	39.40
	28.42	14.21
	7.05	3.52
	1.20	0.60
軽放牧	0.14	0.07

2. 結果

図 2 (a) の砂土の場合、軽放牧で灌木が優占し、かつ重放牧では植物量が急減した。図 2 (b) の砂壤土は、高嗜好性草本から低嗜好性草本へと遷移するとともに、植物量は急減した。また図 2 (c), (d) の壤土、砂埴壤土では、軽放牧で高嗜好性草本が優占し、重放牧では低嗜好性草本が優占した。この場合植物量の減少は明瞭ではなく、砂埴壤土ではむしろ上昇する部分も見られた。

植物量の急減を示した地点と示さなかった地点では、風食量に違いが見られた。図 2 (a), (b) では、重放牧付近での風食量が 25~30 mg/m²/s に達した。植物量の変動と相関が高いことから、風食により非嗜好性植物が減少したと考えられる。図 2 (c) (d) では、そもそも風食量が低く、放牧圧の増減に風食の増減が関連していなかった。

また図 3 に、風食の影響を除去し、同様の計算を行った結果を示す。全土性で、軽放牧で高嗜好性草本が優占し、重放牧で低嗜好性草本が現れた。放牧圧の上昇に対して現存量は明瞭な傾向を持たなかった。図 4 に、根の分布を同一にした場合の結果を示す。今度はどの土性でも、軽放牧で灌木が優占した。また、砂土、砂壤土において風食が活発化し、非嗜好性草本の生長を妨げていた。

3. 考察

モデルシミュレーションで得られた結果の解釈と、表 1 で示したフィールド調査の結果との比較を表 4 に示す。土性の粗い地点は、フィールド調査では O1 (表 1, 図 1a)、シミュレーションでは S1 (表 4, 図 2a) が該当するが、両結果共に、軽放牧で灌木が優占し、放牧圧の上昇と共に植物量が急減した。一方、土性の細かい地点、フィールド調査では O2 (表 1, 図 1b)、シミュレーション結果では S3, S4 (表 4, 図 2c, d) を比較すると、両結果共に、軽放牧で高嗜好性草本が優占し、放牧圧が上昇しても植物量は減少しなかった。このように、フィールド調査とシミュレーション結果がよく整合していることから、立地条件の違い（本研究では土性）が成立植生および放牧への応答の違いを生むことの数値計算による再現は、あ

る程度達成されたと考えられる。今回の4組のシミュレーションで与えた条件の違いは土性のみであったが、それがモデルの内的な相互作用を通して、質的に明確に異なるプロセスを示す結果となった。

既往の生態系モデルの研究では単一の立地のみが考慮され、退行に従い高嗜好性草本から灌木へ優占植物が変化するパターンのみが扱われてきた(Weber *et al.*, 1998; Gao and Reynolds, 2003; Sparrow *et al.*, 1997)。その変化の要因として、土壌水分の鉛直分布が指摘されてきた。これらの既往研究に対し本研究では、風食の影響を明示的に考慮することで、本研究対象地におけるパターンも再現可能であることを示し、更に複数のパターンを単一のモデルで再現可能であることを示すことができた。

風食の影響の除去と根の分布の違いを均一にした試行では、両方の要素が今回の現象の再現に不可欠であることが示された。どちらか一方の要素が除去されると、4つの土性全てで高嗜好性草本と灌木のどちらか一方が選択され、土性による成立植生の差異を再現できなかった。風食を除去した場合に異なる植生機能タイプをもたらす要因は、土性の違いによる土壌上層の保水力の差異のみとなる。今回の例では、その差異だけで灌木の優占をもたらすほど土壌水分の鉛直分布の違いを生まなかったと考えられる。今回は植生機能タイプごとに風食の植物への影響の違いを見つけなかったが、草本への攪乱が土壌上

層での蒸散を抑え、灌木の高い葉面積が風食を抑える傾向があるため、風食は灌木の成立を促したと理解できる。また、土性の粗い地点において重放牧下で低嗜好性草本の繁茂が認められないのは、風食の影響以外に説明できず、この点からも風食が今回の例の再現に不可欠な要因であった。一方、根の垂直分布を均一にした場合、全土性において軽放牧下で灌木が成立した。今回のシミュレーションでは、根の鉛直分布の違い以外に土性の変化によってもたらされる環境変化に応じた灌木と高嗜好性草本の有利/不利を決める要因が含まれていなかったため、排他的に一方が選択されたことは当然といえる。

本研究では、モンゴル国で見られた生態系の応答の差異の再現に焦点を絞ったが、風食の有無が差異の要因であるという点は、広い普遍性を持つと考えられる。中国で広く見られる砂地では風食活動が脆弱性の要因であることが知られている(Li *et al.*, 2005)。そこでは、植生の減少により砂丘が流動化し、植生の侵入を阻むという同様のプロセスがみられる。また重放牧下で植物量が減少せず低嗜好性の植物が侵入する例も各地で報告されている(例えば Friedel *et al.*, 2003)。侵入する植生機能タイプは灌木の報告例が多いが、本研究では低嗜好性草本であった。この違いについて、Sala *et al.* (1997)は、灌木・草本の選択の要因として、気候要因(雨期と温暖な季節の重なり)と土壌条件(土性)を指摘した。本研究での

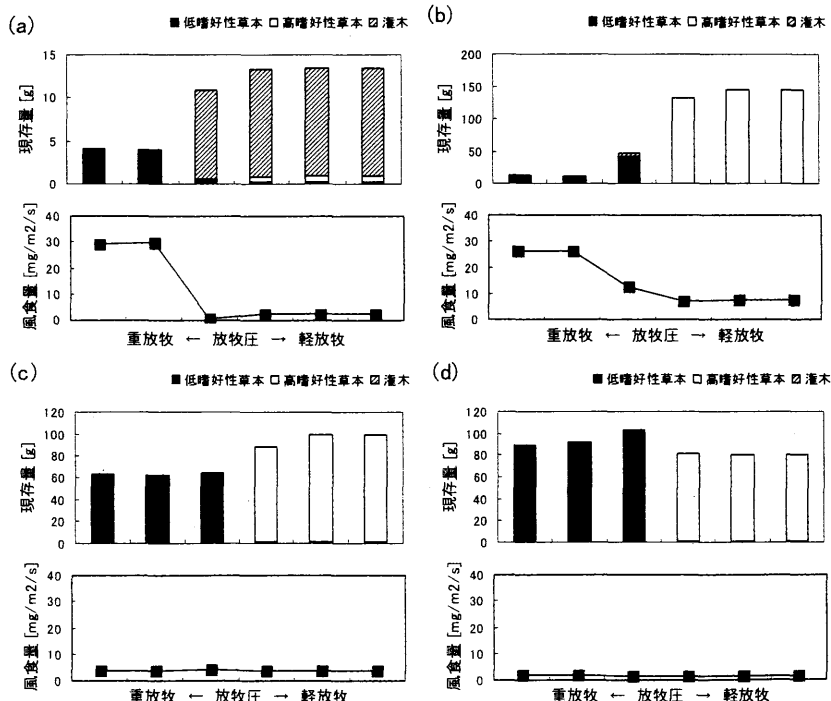


図2 シミュレーションによる植生機能タイプごとの現存量と風食量 : (a) 砂土, (b) 砂壤土, (c) 壤土, (d) 砂埴壤土

立地条件の違いは土性だけであったので、より広い普遍性のためには気候要因を考慮する必要性が示唆される。

異なる生態系の応答を定性的に再現するという点ではある程度成功したと考えられるが、定量的な面では問題が多く、特に灌木の現存量が非常に低く評価されてしまった。モデルの見直しとパラメータの設定両面の検討が必要である。

またパラメータの設定についても、ほぼ既往文献に依存した。特に非嗜好性草本の生理パラメータと、風食による植物への被害の定量的知見が欠けていた。今後現地調査や実験から明らかにしてゆく必要がある。

今回は2つのタイプの応答を対象としたが、他にも環境条件による様々な応答が存在する考えられる。それら

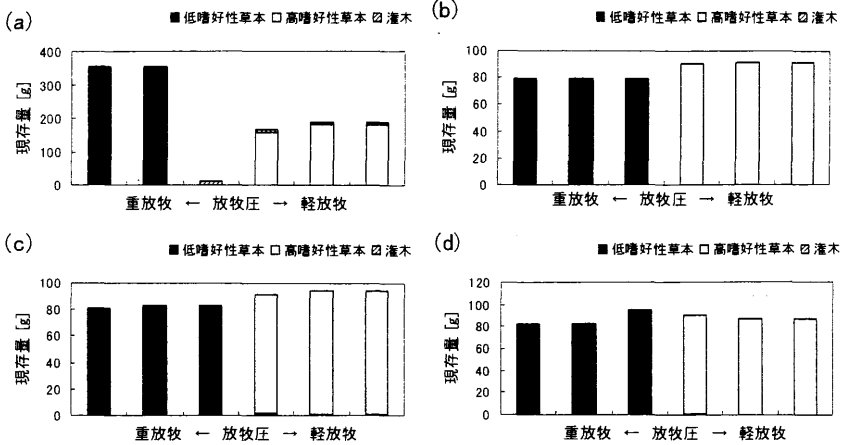


図3 風食効果を除いた場合の、シミュレーションによる植生機能タイプごとの現存量と風食量：(a) 砂土、(b) 砂壌土、(c) 壤土、(d) 砂埴壤土。

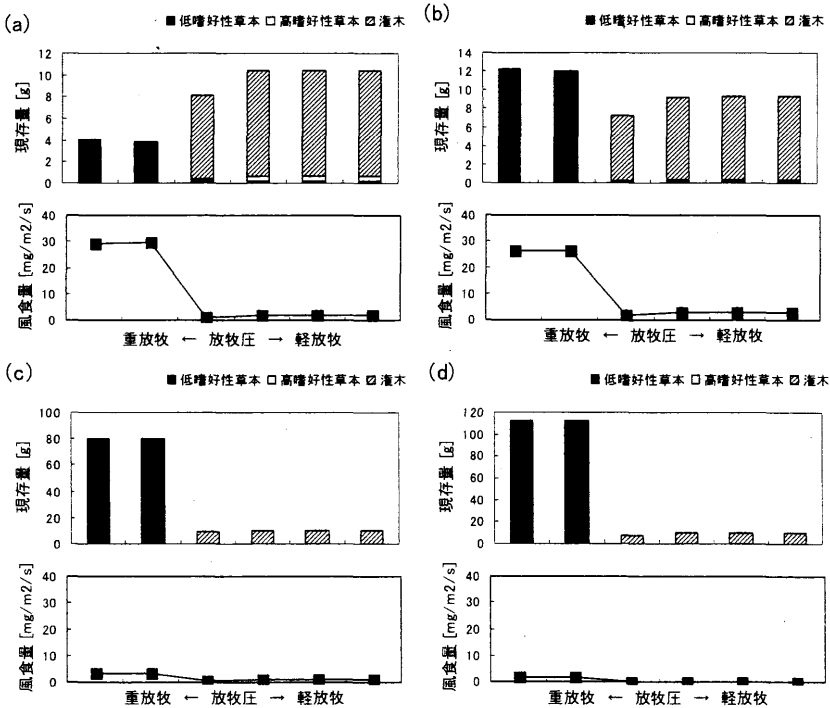


図4 根の鉛直分布の植生機能タイプごとの差異を除去した場合の、シミュレーションによる植生機能タイプごとの現存量と風食量：(a) 砂土、(b) 砂壌土、(c) 壤土、(d) 砂埴壤土。

表4 シミュレーションの結果の要約とフィールド調査との対応。表中 O1 と O2 は、表1の参照記号と対応している。

参照記号	放牧圧増大に対する植生の変化	土性	フィールド調査との対応
S1	灌木の急減	砂土	O1 に対応
S2	高嗜好性草本の急減	砂壤土	O1 と O2 の中間型
S3	高嗜好性草本から低嗜好性草本へ	壤土	O2 に対応
S4	高嗜好性草本から低嗜好性草本へ	砂埴壤土	O2 に対応

のプロセスを環境条件とともに体系的に理解してゆくことで、様々な環境の混在する地域の土地利用プランニングに還元してゆけると思われる。

謝辞

本研究は、環境省地球環境研究総合推進費 H16 地球環境問題対応型研究課題「北東アジアにおける砂漠化アセスメント及び早期警戒体制 (EWS)構築のためのパイロットスタディ」(G-2) の環として行ったものである。また本研究には、アメリカ合衆国 NOAA Satellite and Information Service, National Climatic Data Center の配布する気象データ Global Summary of the Day の利用が不可欠であった。

補注

¹⁾ Global Summary of the Day,

<http://www.ncdc.noaa.gov/cgi-bin/res40.pl>, 2006/05/10 参照

引用文献

- Argen, G. I., R. E. McMurtrie, W. J. Parton, J. Pastor and H. H. Shugart (1991) State-of-the-art models of production-decomposition linkages in conifer and grassland ecosystems. *Ecological Applications*, Vol. 1, 118-138.
- Chen, S. P., Y. F. Bai, G. H. Lin, Y. Liang and X. G. Han (2005a) Effects of grazing on photosynthetic characteristics of major steppe species in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Photosynthetica*, Vol. 43, 559-565.
- Chen, S., Y. Bai, L. Zhang and X. Han (2005b) Comparing physiological responses of two dominant grass species to nitrogen addition in Xilin River Basin of China. *Environmental and Experimental Botany*, Vol. 53, 65-75.
- 陳 佐忠・汪 持平 (編著) (2000) 中国典型草原生態系統. 科学出版社, 北京, 中国, 412pp.
- Dregne H., M. Kaasas, B. Rosanov (1991) A new assessment of the world status of desertification. *Desertification Control Bulletin*, Vol. 20, 6-29.
- Friedel, M. H., Sparrow, A. D., Kinloch, J. E. and Tongway, D. J. (2003) Degradation and recovery processes in arid grazing lands of central Australia. Part 2: vegetation. *Journal of Arid Environments* 55, 327-348.
- Gao, Q. and J. Reynolds (2003) Historical shrub-grass transitions in the northern Chihuahuan Desert: modeling the effects of shifting rainfall seasonality and event size over a landscape gradient. *Global Change Biology*, Vol. 9, 1475-1493.
- Gao, Q., X. Zhang, Y. Huang and H. Xu (2004) A comparative analysis of four models of photosynthesis for 11 plant species in the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 126, 203-222.
- Haase, P., F. I. Pugnaire, S. C. Clark and L. D. Incoll (1999) Environmental control of canopy dynamics and photosynthetic rate in the evergreen tussock grass *Stipa tenacissima*. *Plant Ecology*, Vol. 145, 327-339.
- Kemp P. R., J. F. Reynolds, Y. Pachepsky and J.-L. Chen (1997) A comparative modeling study of soil water dynamics in a desert ecosystem. *Water Resources Research*, Vol. 33, 73-90.
- Li, F.-R., L.-F. Kang, H. Zhang, L.-Y. Zhao, Y. Shirato and I. Taniyama (2005) Changes in intensity of wind erosion at different stages of degradation development in grasslands of Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, Vol. 62, 567-585.
- Moretto, A. S. and R. A. Distel (1997) Competitive interactions between palatable and unpalatable grasses native to a temperate semi-arid grassland of Argentina. *Plant Ecology*, Vol. 130, 155-161.
- 農林水産省農林水産技術会議事務局編 (1996) 日本飼養標準: めん羊中央畜産会, 東京, 108pp.
- Sala, O. E., W. K. Lauenroth and R. A. Golluscio (1997) Plant functional types in temperate semi-arid regions. In: Smith, T. M., H. H. Shugart and F. I. Woodward ed. "Plant Functional Types", pp217~233, Cambridge University Press, New York.
- Shao, Y. (2000) *Physics and Modelling of Wind Erosion*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 393pp.
- Sparrow, A. D., M. H. Friedel, D. M. S. Smith (1997) A landscape model of shrub and herbage dynamics in Central Australia, validated by satellite data. *Ecological Modelling*, Vol. 97, 197-216.
- Vesk, P. A. and M. Westoby (2001) Predicting plant species' responses to grazing. *Journal of Applied Ecology*, Vol. 38, 897-909.
- Weber, G. E., F. Jeltsch, F. N. van Rooyen and S. J. Milton (1999) Simulated long-term vegetation response to grazing heterogeneity in semi-arid rangelands. *Journal of Applied Ecology*, Vol. 35, 687-699.
- Xiao, C.-W., O. J. Sun, G.-S. Zhou, J.-Z. Zhao and G. Wu (2009) Interactive effects of elevated CO₂ and drought stress on leaf water potential and growth in *Caragana intermedia*. *Trees*, Vol. 19, 711-720.