

G-2 砂漠化指標による砂漠化の評価とモニタリングに関する総合的研究

(3) 砂漠化回復手法の評価に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

国際室

鄭 元潤 (平成 13~15 年度 EFF)

清水英幸

環境研究基盤技術ラボラトリー

戸部和夫

平成 13~15 年度合計予算額	7, 192 千円
(うち、平成 15 年度予算額	2, 543 千円)
上記の予算額には、間接経費	1, 660 千円 (587 千円) を含む

[要旨]

中国においては、これまで砂漠化からの回復について多くの経験が積み重ねられてきているが、効果的で効率的な砂漠化回復手法が確立されているとはいえない。その主な要因として、①既往の関連情報が系統的に整理されておらず、既往の経験的知見に基づいた効果的な砂漠化回復手法が確立されていないこと、および、②砂漠化回復のための緑化に用いられる植物種の特性が十分解明されておらず、各植物種の特性に基づいた効果的な手法による緑化が行われていないこと、の二つがあげられる。そこで、中国の典型的な砂漠化地域の一つであるムウス沙地を主な対象として、既往の文献情報の整理および代表的な緑化植物種の特性解明を行い、効果的で効率的な砂漠化回復手法を提示することを目的として研究を行った。

まず、既往の砂漠化からの回復に関する文献情報の収集と整理を行うと共に、文献情報のデータベース化を行った。特に、飛行機播種法や苗木移植法、および植物の生理生態に関してレビューを行った。さらに、播種や苗木の植栽による効果的な緑化を行うための基盤的知見を提供するため、対象地域で砂漠化からの回復のための緑化に頻繁に用いられているいくつかの植物種につき、環境制御室を用いた実験により、種子発芽、砂中からの実生の出現、苗木移植時の再生および苗木の生長に及ぼす環境要因の影響を検討した。その結果、光強度、温度、水分状態などの環境要因に対するこれらの植物種の生理生態的特性が明らかになった。種子発芽反応は植物種によって異なったが、光強度、高温・低温処理、あるいは水ストレス処理によって、顕著に影響を受ける種も存在した。また、これらの諸環境要因の複合効果(交互作用)による発芽阻害なども認められた。さらに、播種した種子が発芽し、実生が定着するためには、種子が砂中 5~40 mm の深さに埋もれることが必要であることが明らかとなった。植物の苗木移植における枝葉除去等の前処理の効果についても、十分な生育を確保する条件が示された。また、苗木の生長におよぼす給水条件の影響を調べた結果、2種の *Artemisia* 属の植物種は様々な水分条件の地域の緑化に適用可能であるのに対し、他の2種はより乾燥した地域の緑化に適することなどが明らかとなった。

[キーワード] 回復評価、中国、種子発芽、生理生態特性、緑化植物

1. はじめに

中国には、広大な沙漠が8つと広大な沙地が4つあるが(図1)、4つの広大な沙地には、砂漠化が最も深刻な地域および砂漠化の危険度が高い地域が含まれている(図2)。特にムウス沙地では、砂漠化が深刻な状況にあるので¹⁵⁾、この沙地を本研究の調査対象地域に選定した。

中国の最近の砂漠化には、気候変動を含む環境変化や、人間活動特に不適切な土地管理政策等の複雑な要因が影響しており、それ故、多くの砂漠化回復手法が提案、実施されてきた。これまでの研究から、ムウス沙地の植生回復には飛行機播種法と苗木移植法が直接的な緑化手法として適当であると考えられてきた¹¹⁾。しかし、主要な緑化植物種を用いてこれらを実施するうえでは、これまでいくつかの問題点が指摘されている。例えば、飛行機播種では、種子発芽率や実生の定着率が低く¹³⁾、また、苗木移植についても、その植栽前の処理方法によってその後の苗木生存率が異なる。これらは経験的にはよく知られているが、その本質的な理由は現在も明らかではなく、混沌としている。したがって、これらの植物種による砂漠化回復を効果的・効率的に実施するためには、各植物種の特性を総合的に理解することが必要であり、そのために、種子の発芽から始まる各々の生育段階での各植物種の生理生態的特性を実験的に明確にする必要がある。

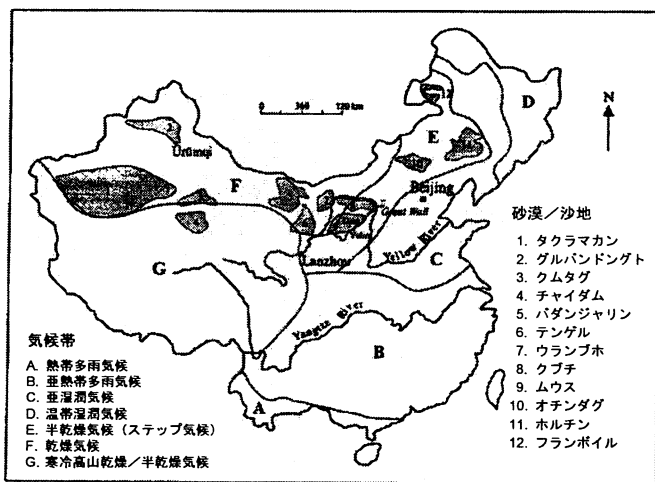


図1 中国における砂漠と沙地の分布¹⁵⁾

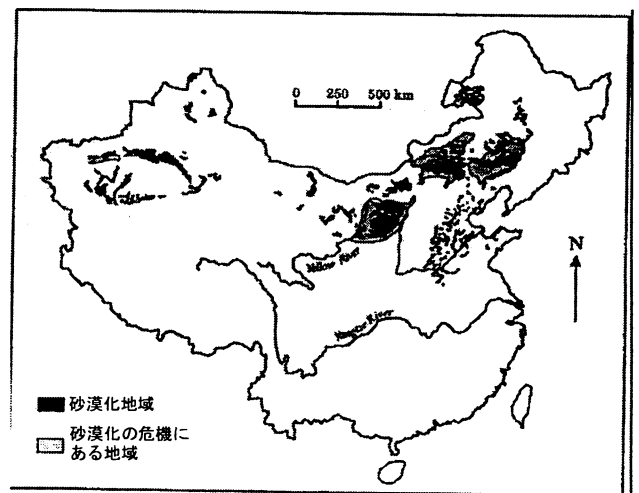


図2 中国における砂漠化地域の分布¹⁵⁾

2. 研究目的

中国の典型的な砂漠化地域であるムウス沙地を対象として、有効な砂漠化からの回復手法を提示するための、適正な緑化植物種の選定方法やそれらの導入方法を明らかにすることを目標とする。このために、①既往の砂漠化地域の植生回復手法に関する文献情報等の収集・整理とデータベース化、および、②砂漠化地域の代表的な緑化植物種の生理生態特性の実験的解明、の二つを並行して実施する。すなわち、文献等の情報から、これまでにムウス沙地などにおいて開発・適用されてきた緑化による砂漠化回復手法を整理し、各手法の特性等を明らかにする。さらに、中国において砂漠化地域の緑化に用いられている植物種の生理生態的特性(特に発芽や栄養生長時の特性)を実験的に検討し、最適な緑化植物種による植生回復手法を検討する。このような研究を行うことにより、ムウス沙地における砂漠化地域で実施されている砂漠化回復手法の客観的な

評価が行え、各手法の特性や適用可能条件等を明らかにすることが可能となる。さらに、ムウス沙地の砂漠化地域の地域特性や砂漠化の状況に対応した、実効性のある砂漠化回復手法の確立に資する。

3. 研究方法

(1) 文献調査

砂漠化回復手法の全体像と中国における評価を把握して、更なる研究のための情報基盤を提供するために、砂漠化回復手法に関するデータベースの構築を試みた。構築作業のため、文献、政府資料、専門家の論文、中国の年次統計記録、地元の人々が築いてきた知識と経験などの情報に関し、中国語と英語の記録資料を収集し、これらに含まれる情報を整理した結果、包括的データベースを構築することができた。

(2) 環境制御実験

飛行機播種による緑化に関しては、種子発芽や実生定着があまり良くなく、苗木にまで生長するものが多い理由を解明して、緑化技術を改良・推進するために、ムウス沙地に生育する、*Agriophyllum squarrosum*、*Artemisia ordosica*、*Artemisia sphaerocephala*、*Astragalus adsurgens*、*Caragana intermedia*、*Caragana korshinskii*、*Glycyrrhiza uralensis*、*Hedysarum fruticosum*、*Medicago sativa* などの主要植物種を用い、種々の発芽実験を行った。これらの種子は、2000年夏～秋期に採集し、保存しておいたものを用いた。

発芽実験は、温湿度や光条件が自動制御されるグロースチャンバーを用いて実施した。照明には低温白色蛍光灯を用い、これらの蛍光灯を一定間隔で点灯および消灯させることにより、チャンバー内の1日の光周期を調節した(10時間暗期/14時間明期)。多くの実験では、ペトリ皿(直径:90 mm、高さ:15 mm)に濾紙(Toyo-No.1)を3枚敷いて、種子を播き、発芽実験を行った。濾紙を5 mlの蒸留水で湿らせて、種子の半分ほどが蒸留水に浸漬するようにした¹²⁾。発芽実験では、フルランダム化階乗法を採用した。植物種ごとに、通常5段階の環境条件を設定し、各種毎に計25個のペトリ皿をランダムに選んだ。種子の観察は1日1回ずつ行った。

また、発芽実験の一部および実生の生長実験に関しては、川砂/海砂を十分に水道水で洗浄した後、乾燥させ、篩にかけて、ムウス沙地の砂の粒径分布に似せた培養土(砂)を作成し、これを用いて実験を実施した。

苗木移植実験に関しては、より適切な前処理方法を検討するとともに、苗木移植に適した時期を明らかにすることを目的として、*Artemisia ordosica*、*Artemisia sphaerocephala*、*Medicago sativa* の3植物種に対し再生実験を実施した。温湿度を環境制御した自然光型温室内で種子から7ヶ月間育成した苗木を用い、苗木を3種類の異なる前処理を行った後の苗木の温室内での生長を調べた。

さらに、4種の緑化植物種(*Artemisia ordosica*、*Artemisia sphaerocephala*、*Caragana korshinskii* および *Hedysarum fruticosum*)に対しては、給水量を変えることで水ストレスをかけて栽培し、各植物の生長量を計測し、乾燥耐性能について考察した。

4. 結果・考察

(1) 文献情報の調査とデータベースの構築－砂漠化回復手法の整理

852点の文献のうち483点の重要度の高い文献につき、著者、出典、題目、年代、キーワード、要旨の各項目ごとに区分し、詳細なデータベースを構築した。さらに、研究内容に関しては、研究手法、植物種、地域名、気候区などに関する情報を抽出して整理した。

文献調査の結果、効果的な砂漠化回復手法として、以下のものが認められた²⁾。

- ・ 流動砂丘の固定
- ・ 農地保安林の構築
- ・ 草方格・粘土・小石を使った囲い
- ・ 砂地の農林地化
- ・ 節水灌漑技術(プラスチックフィルム)の使用
- ・ 乾燥地における流去水の効率的利用
- ・ 洪水灌漑
- ・ 化学的土地改良
- ・ アルカリ土壌・塩性土壌の改良
- ・ 飛行機播種
- ・ 苗木移植
- ・ 温室の使用
- ・ 過放牧草原の制限
- ・ 放牧ローテーションの最適化
- ・ 飼料エネルギー再利用農場の確立
- ・ 風力エネルギーの利用
- ・ 太陽エネルギーの利用

さらに、上記の物理的、化学的、生物学的および社会経済的な砂漠化回復手法の中では、低コストで実行性が高く持続性が高いという特徴を併せ持つのが生物的な手法である。また、現地における緑化－植生回復手法においては、飛行機播種と苗木移植が最も直接的な効果が得られると考えられたが、その効率性に関しては、より検討を要すると思われた。

飛行機播種法の評価に関しては、播種に適切な時期や播種時の地域環境の選定に焦点を当て、苗木の育成に関しては植物種ごとの特性の相違に特に注目して調べた。*Caragana intermedia*、*Astragalus adsurgens*、*Artemisia ordosica*、*Hedysarum fruticosum*、*Glycyrrhiza uralensis* は、飛行機播種に頻繁に用いられる植物種であり、播種の時期としては6月初旬が最も適当であるが、苗木に達するまで生育するものは少ない¹³⁾。実地調査によれば、浅く埋まるか地表に播かれただけの種子は、発芽生長したとしても高温による傷害を受けやすく生存率が低い^{16,17)}。どの植物種にどの播種時期が適しているか、播種された種子にどのような生理生態学的メカニズムが働くかはほとんど明らかになっていない。

光は種子発芽をはじめとする植物の生育過程における重要な環境要因である^{8,10)}。気温や水ストレスは、種子の発芽能を左右する膜透過性、膜含有タンパク質の活性やサイトソル酵素を含む

数多くの生理過程に影響を及ぼすものと思われる^{1,6,7)}。しかし、気温、水ストレス、光条件がムウス沙地における種子の発芽に及ぼす影響(相互作用を含む)についての情報はほとんどない。

苗木を移植する前に葉と幹の一部を剪定して除去すると生存率が上がるのは確かである¹⁸⁾。しかし、この方法が最良か、他にもっと良い方法があるかについては、議論の余地がある。主要植物種の生理生態的特性を理解して、苗木移植に適した方法を提示するために、主要灌木種と主要草本種(*Artemisia ordosica*、*Carex duriuscula*、*Cynanchum homarovii*、*Hedysarum mongolicum*、*Hedysarum scoparium*、*Leymus Chinese*、*Sabina vulgaris*、*Salix cheilophila*、*Salix microstachya*、*Salix psammophila*)の蒸発率、光合成、水利用効率や水収支などの主要な生態学的特性が論文上^{3-5,9,14,19)}で発表されてきた。しかし、これらのデータのほとんどが自然条件下または単純な人工環境下での測定値に基づいているので、他の多種多様な環境にそのまま適用することはできない。このため、ある特定の環境における特定の植物の反応を説明することは難しく、これらデータの適用範囲は限定されがちであった。したがって、環境条件の制御された条件下での詳細な実験の実施が必要である。

なお、本研究においては、ムウス沙地を主な対象とし、そこに生育する、*Agriophyllum squarrosum*、*Artemisia ordosica*、*Artemisia sphaerocephala*、*Astragalus adsurgens*、*Caragana intermedia*、*Caragana korshinskii*、*Glycyrrhiza uralensis*、*Hedysarum fruticosum*、*Medicago sativa*などの植物種について検討を行うが、ムウス沙地現地における気温と降水量の季節変化を図3に示す。

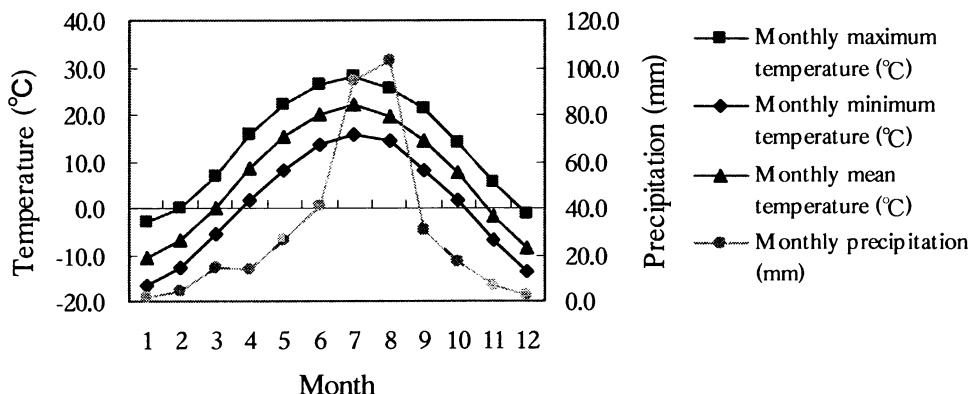


図3 ムウス沙地の気温と降水量の月別統計量

(2) 環境制御実験による植物の生理生態特性の解明

① 発芽実験：光強度特性

野生植物では種子の発芽時に光照射を必要とする種(光発芽種子)が多いが、砂漠化地域のような乾燥地域に生育する植物種でも発芽時における光の必要性、また、光強度の影響について検討した。400、100、25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度、および暗環境(0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)という4段階の光強度を設定して、10:20℃(暗期:明期)で実験を行った。暗条件以外では、9.8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光の下で種子を毎日調べ、根の出現をもって発芽とみなした。これらのこれらの条件において発芽率がほとんど一定になるまで実験を続けた。暗環境下の種子については、実験最終日に1回だけ発芽を調査した。結果を図4に示す。

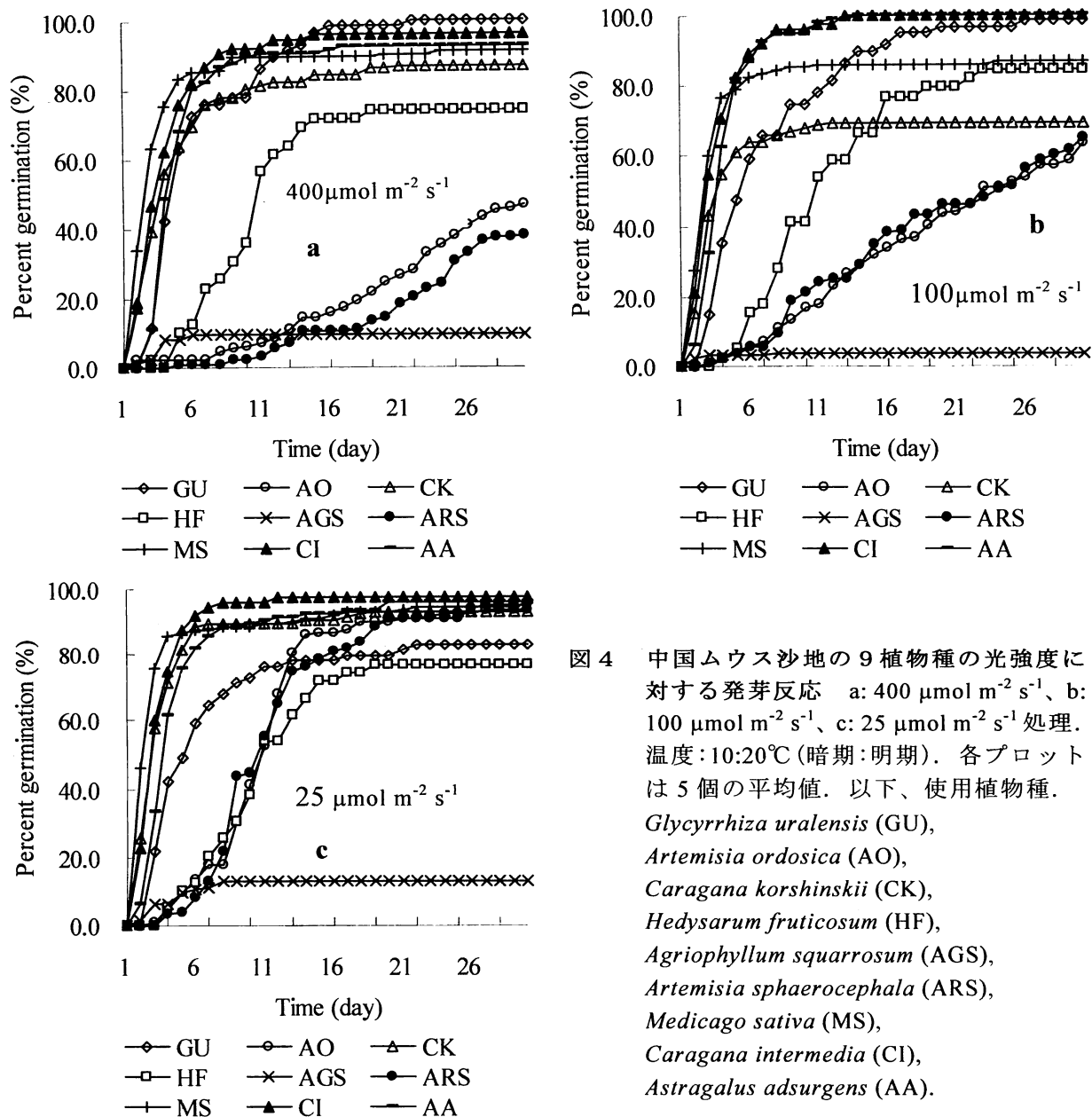


図4 中国ムウス沙地の9植物種の光強度に対する発芽反応 a: $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、b: $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、c: $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 処理。温度: $10:20^\circ\text{C}$ (暗期: 明期)。各プロットは5個の平均値。以下、使用植物種。
Glycyrrhiza uralensis (GU),
Artemisia ordosica (AO),
Caragana korshinskii (CK),
Hedysarum fruticosum (HF),
Agriophyllum squarrosum (AGS),
Artemisia sphaerocephala (ARS),
Medicago sativa (MS),
Caragana intermedia (CI),
Astragalus adsurgens (AA).

図には示さないが、これらの植物全9種に関して、暗環境下ではほぼ100%の発芽率を示し、発芽に際し、光は必須でないことが明らかになった。光強度の影響に関して9種の植物は、大きくは2タイプに分類することができた。その一つは発芽率が光強度によって左右されないタイプであり、*Hedysarum fruticosum*、*Caragana korshinskii*、*Caragana intermedia*、*Glycyrrhiza uralensis*、*Medicago sativa* および *Astragalus adsurgens* の6種がこのタイプに該当する。*Glycyrrhiza uralensis* の最終発芽率は光強度の低下につれて僅かに下がったが、発芽の低下は有意ではなかった。もう一つのタイプは最終発芽率が光強度によって大きく抑制されるのが特徴であり、*Agriophyllum squarrosum*、*Artemisia sphaerocephala* および *Artemisia ordosica* が該当する。光強度の影響を最も顕著に受けたのは *Agriophyllum squarrosum* であり、 $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ という弱光で最終発芽率は大

大きく抑制された(僅かに 12.9%)。一方、*Artemisia sphaerocephala* と *Artemisia ordosica* の発芽率は $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 下では高く、暗環境との間に有意差はなかった。また、 $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光を 6~7 日間照射した後に暗環境に移した *Agriophyllum squarrosum* の種子は、その後もほとんど発芽せず、この種の発芽能力が強光によって消失することが判明した。これに対して、*Artemisia sphaerocephala* と *Artemisia ordosica* の種子を光照射環境から暗環境に移したところ、ほとんどの種子が発芽して、最終発芽率は暗環境下とほとんど変わらなかった。

② 発芽実験：光-温度特性

温度が発芽に及ぼす影響については、5:15、10:20、15:25、20:30 および 25:35(暗期:明期の温度、単位=°C)の 5 種類の温度の組み合わせで、完全無作為化法のもとで実験を行った。明期(照明点灯時)の光強度は約 $215 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。

砂漠化地域に生育する植物種のうち、*Artemisia ordosica* を、様々な温度条件下で種子発芽実験を行った際の経時変化を図 5 に示す。光照射条件下では、*Artemisia ordosica* の発芽率は 20/30°C(暗期/明期)で最大であったが、連続暗条件下で実験した場合と比べると、光阻害により発芽率が低下していた(図 6)。光と温度の二元配置分散分析の結果を表 1 に示す。光も温度も有意な影響を持っているが、それらの相互作用(交互)もまた有意であった。温度と光は複雑に種子発芽に影響することが示された。

同条件下で、*Caragana intermedia* の発芽率は 10/20°C(暗期/明期)で最大になり、やはり、暗条件下での発芽実験の結果と比べると、発芽率が光照射により阻害されていることが判明した(図表示さず)。*Caragana intermedia* と *Artemisia ordosica* の 2 種の種子発芽率の温度依存性を比較すると(図 7)、前者は温度に対し比較的一定の発芽率を示したが、後者では、特に低温条件下で発芽率の低下が大きいことが判明した。*Artemisia ordosica* は、低温かつ光が強い環境条件下では、ほとんど発芽不能であることが判明した。

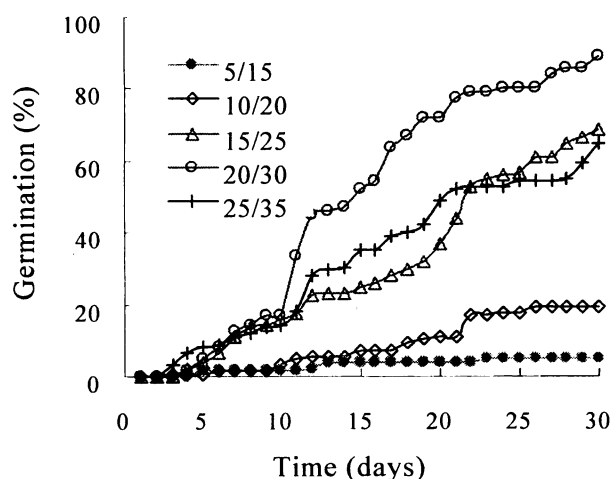


図 5 異なる温度条件(暗期/明期: °C)での *Artemisia ordosica* の種子発芽率の経時変化(明期光量子数: 約 $215 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。

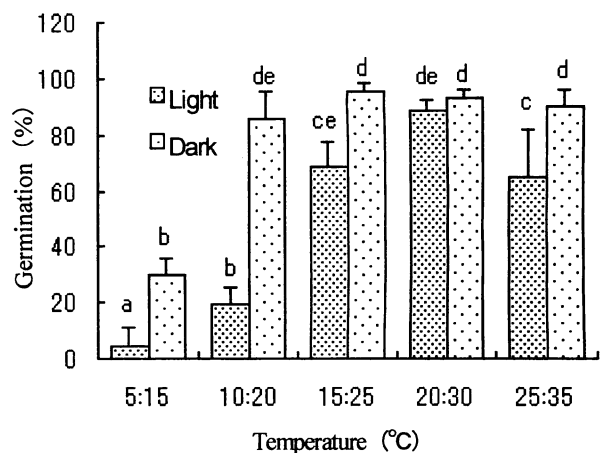


図 6 異なる光条件 ($215 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 光照射(明期)または暗処理)および異なる温度条件下での *Artemisia ordosica* の発芽率(平均値±SE)

表1 *Artemisia ordosica* の発芽率の二元配置分散分析 (ANOVA) の結果
5種類の温度および光照射の有無の条件で発芽率を調べた。

環境要因	Df	MS	F
照明 (L)	1	1.972	145.467***
温度 (T)	4	1.370	101.034***
L × T	4	0.140	10.301***
誤差	40	0.0136	

注：***は P<0.001 の意味。

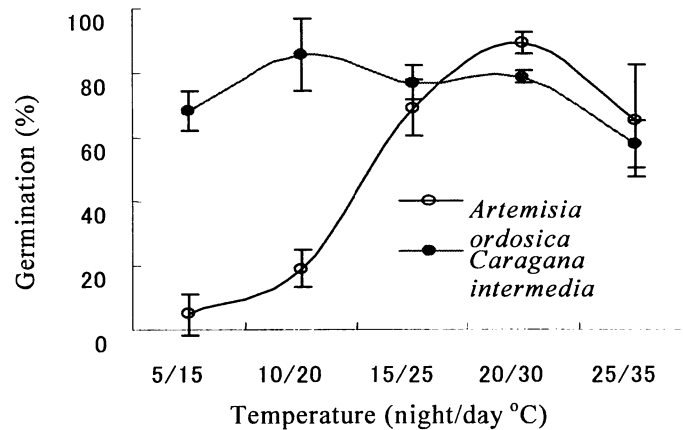


図7 *Artemisia ordosica* と *Caragana intermedia* の
種子発芽率の温度依存性 (Mean±SD, n=5)

ムウス沙地では、砂漠化回復のため緑化植物の飛行機播種あるいは人工植林が行われている。広域の緑化には飛行機播種がより効率的である。一方、飛行機播種は、飛行に適した雨季前や種子の散布に適した風の弱い時期に行われることが一般的であり、その時期はまた、気温はまだ低く、日射が強い時期と重なることが多い(図3参照)。本実験で得られた結果から判断すると、現在行われている飛行機播種の時期の環境条件は *Artemisia ordosica* の種子発芽にとって不利と思われる。このような発芽特性が、*Artemisia ordosica* の飛行機播種があまり成功していないことの原因となっていると推測される。ここで得られた基盤的な研究成果は、中国における緑化推進のための飛行機播種の現実的な技術を改善するのに役立つと思われる。

③ 発芽実験：温度－水分ストレス特性

乾性地では、水分環境が種子発芽やその後の生長に顕著な影響があることは容易に想像される。そこで、Polyethylene Glycol (PEG)を用いて、様々な段階の水ストレス状態を作成し、種子発芽時の温度(10, 15, 20, 25, 30°C一定)と水ストレスの影響についても実験を行った。様々な温度条件下で *Astragalus adsurgens* と *Artemisia ordosica* の2種の発芽の水ストレス特性を比較した(図8)。高温(30°C)および低温(10°C)の環境条件では、いずれの水ストレス処理でも、*Astragalus adsurgens* は *Artemisia ordosica* より発芽率が高かった。*Astragalus adsurgens* のほうが *Artemisia ordosica* よ

りも温度や水ストレスに対する環境適応性が高いと考えられ、特に気温の低い早春や気温が高くなる夏期においては、*Astragalus adsurgens* の方が、飛行機播種等による緑化に適していることが示唆された。

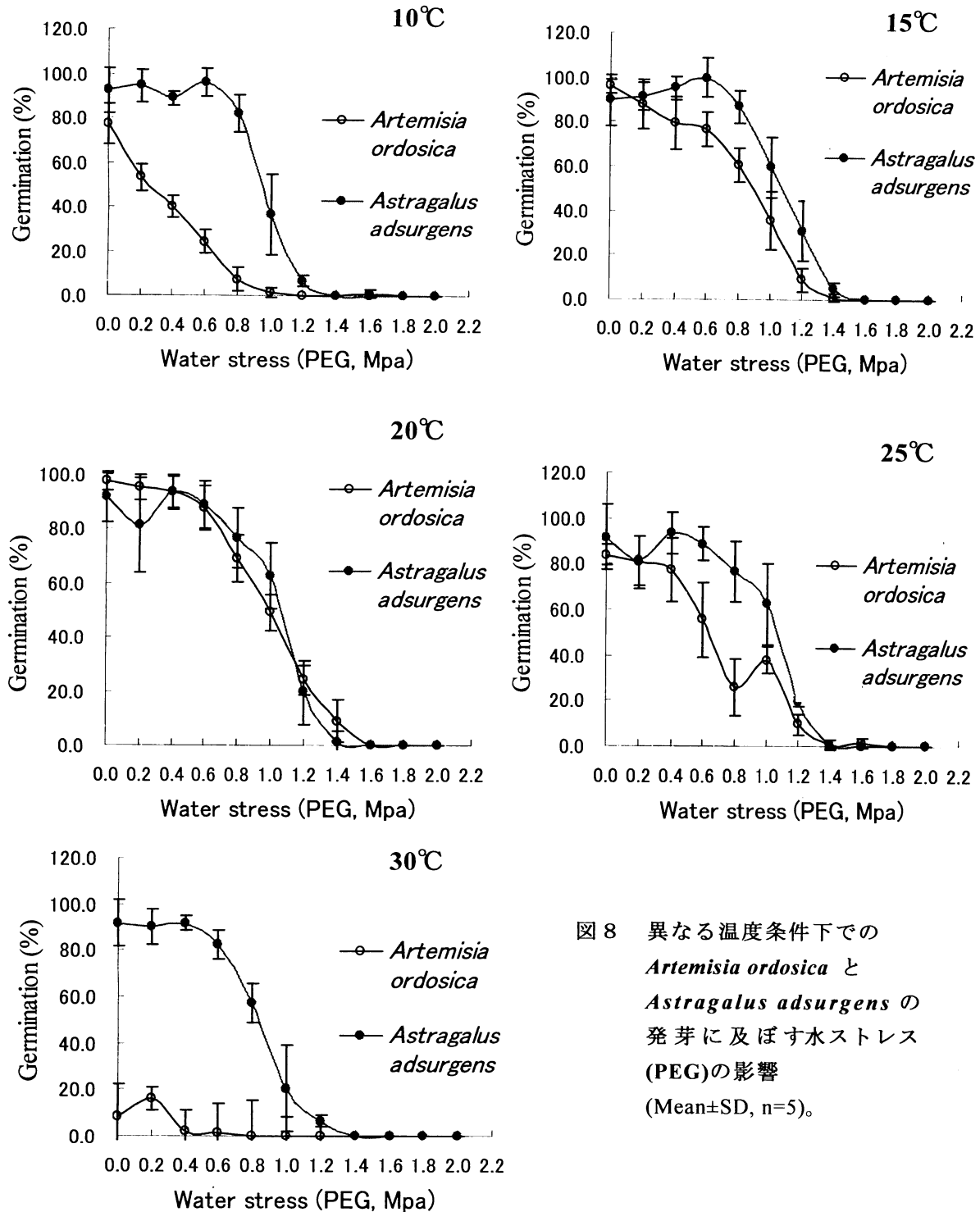


図8 異なる温度条件下での *Artemisia ordosica* と *Astragalus adsurgens* の発芽に及ぼす水ストレス (PEG) の影響 (Mean±SD, n=5)。

④ 砂被覆時の種子発芽・実生の出現実験

ムウス沙地の植物6種の種子を、ポット内に詰めた砂の上または砂中の異なる深さに埋め、異なる量の給水を行ったときの実生の出現率を調べた(図9)。

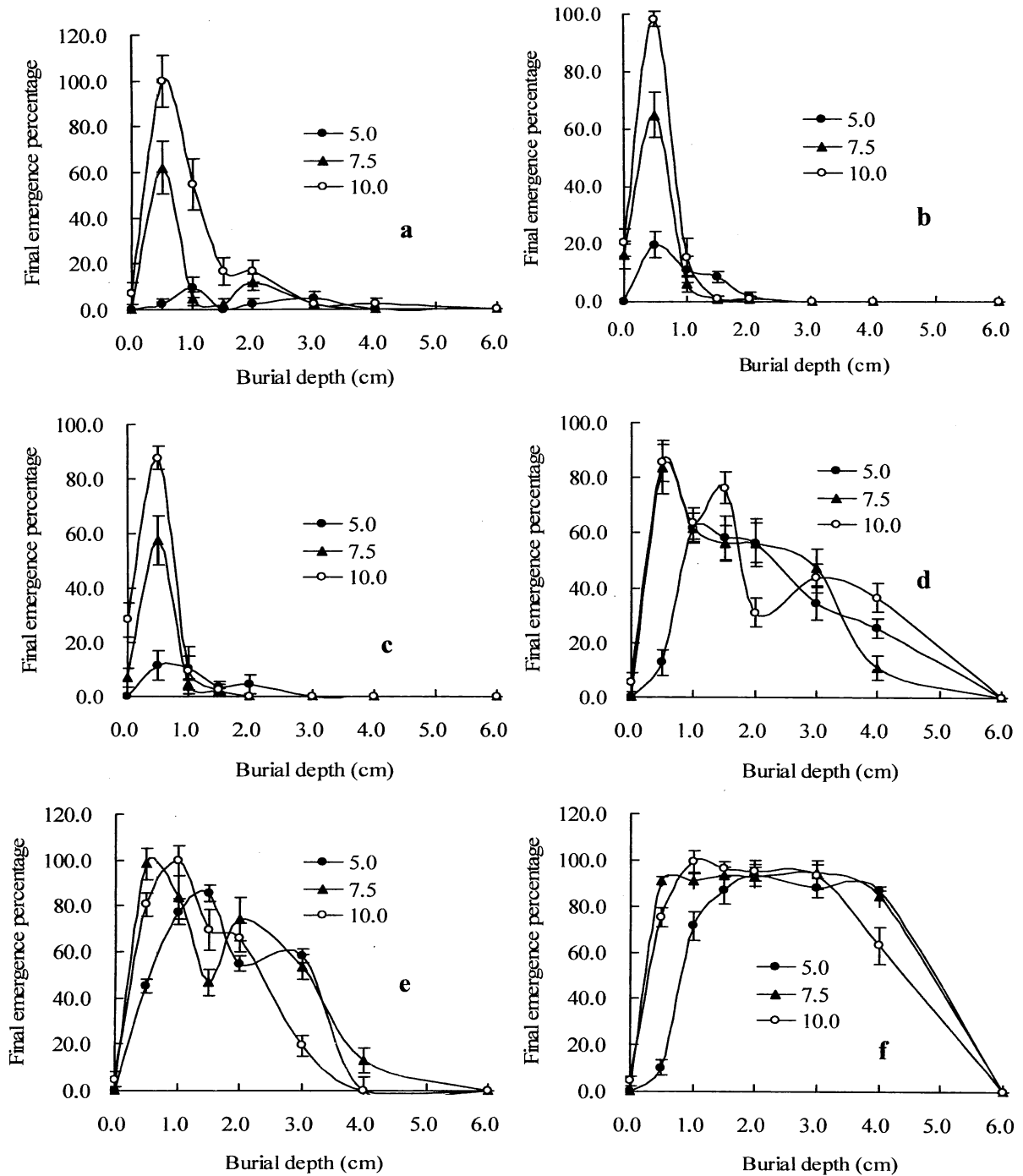


図9 6植物種の種子を砂中の異なる深さ(0~6 cm)に埋めて給水(5.0, 7.5, 10.0 mm/each 3 day)処理したときの実生の出現率 a: *Agriophyllum squarrosum*, b: *Artemisia sphaerocephala*, c: *Artemisia ordosica*, d: *Caragana korshinskii*, e: *Hedysarum fruticosum*, f: *Medicago sativa*.

本実験においては、砂上に播種したときには、いずれの植物種の種子も発芽しなかった。光によって発芽が阻害されない植物の種子についても(図4参照)、発芽が認められなかったのは、砂漠化地域の環境では、砂に埋もれることによって、種子の周り全体の水分環境が重要であることを示唆する。

Agriophyllum squarrosum、*Artemisia sphaerocephala* および *Artemisia ordosica* の3植物種では、種子が埋まる深さが0.5 cmのときに最も実生の出現率が高く、砂による被覆の厚さが1 cm以上になると、実生の出現は大幅に抑えられた。これらの植物では暗環境で種子発芽が良いにも拘わらずも(図4)、水分を十分に与えても厚い砂被覆条件では発芽が抑制されており、砂の被覆による物理的バリアーが実生の出現を抑制したことを示唆する。なお、砂被覆が0.5 cmの場合には、給水量が大きいほど実生の出現率は高かった。

一方、*Caragana korshinskii*、*Hedysarum fruticosum* および *Medicago sativa* では、砂の被覆が0.5 cmから3~4 cmのときに実生の出現率が高かったが、それ以上の被覆は実生の出現を抑制した。また、0.5 cmの被覆厚の場合には、5.0 mm day⁻¹の給水条件では、これらの植物でも発芽率が低く、砂被覆が薄い場合には、水分環境が実生の出現の制限要因になることが示された。これは、全植物種で認められた。これらの2つの植物タイプを見る限りでは、*Agriophyllum squarrosum*、*Artemisia sphaerocephala* および *Artemisia ordosica* よりも、*Caragana korshinskii*、*Hedysarum fruticosum* および *Medicago sativa*の方が、砂漠化地域における発芽の適応能は高いように思われた。

⑤ 苗木移植時の再生実験

比較的若い苗木の移植により植生回復を行う際には、実際上取り扱いやすく、かつ十分な再生を維持するような適切な前処理方法を検討する必要がある。本実験では、苗木移植の適切な前処理方法と、移植に適した時期を明らかにすることを目的として、*Artemisia ordosica*、*Artemisia sphaerocephala* および *Medicago sativa* の3植物種に対し再生実験を実施した。

苗木を環境制御温室内で種子から7ヶ月間育成して実験に用いた。苗木の前処理には以下の3種類を用いた。

- 全ての葉のみをを除去する (対照=No cut)
- 全ての葉を除去した上で、幹の上部半分ほどを除去する (半除去=Half cut)
- 地上部分の葉と幹部分の全てを除去する (全除去=Hall cut)

実験は、自然光型の温湿度制御(昼間50%/夜間60%)グロースチャンバー4台を用いて行った。各チャンバーに各々の温度(10:15、12.5:17.5、15:17.5、17.5:22.5(夜間:昼間、単位=℃)設定を行い、同じ切除処理を施した苗木を各チャンバーに12本ずつ用意して、約4週間の実験の後刈り取った。個々の植物体を葉、幹と枝、根に分離した。葉については、植物体から分離した直後に葉面積の測定を行った。植物体の各器官は、80~90℃で3日間以上乾燥し、乾燥重量を測定した。

*Artemisia ordosica*の結果を図10および表2に示す。全除去処理された苗木の葉面積と葉および幹枝の乾重量は、半除去処理および対照と比べ顕著に小さかった。全除去処理の苗木では、葉面積も各器官の乾重量の増加も4週間ではあまり変化がなく、温度も有意な影響を及ぼさなかった。半除去処理と対照を比較すると、その間にほとんど有意差は認められなかった。これらの苗木の葉面積および葉と幹枝の乾重量の増加に温度は有意な影響を及ぼし、実験条件の範囲では温

度が高いほど植物の生長は大きかった。また、根の乾重量については、4 週間では、全ての切除処理、全ての温度条件で有意差は認められなかった。二元配置の分散分析の結果、前処理の効果は葉面積と葉乾重量、幹枝乾重量で認められた。また、温度の効果は葉面積と葉乾重量でのみ認められた。しかし、温度と切除処理の相互作用(交互効果)は何れの器官でも認められなかった。なお、他の2種の植物 *Artemisia sphaerocephala*、*Medicago sativa* における温度と切除処理の影響も、*Artemisia ordosica* の場合とほぼ同様であった。

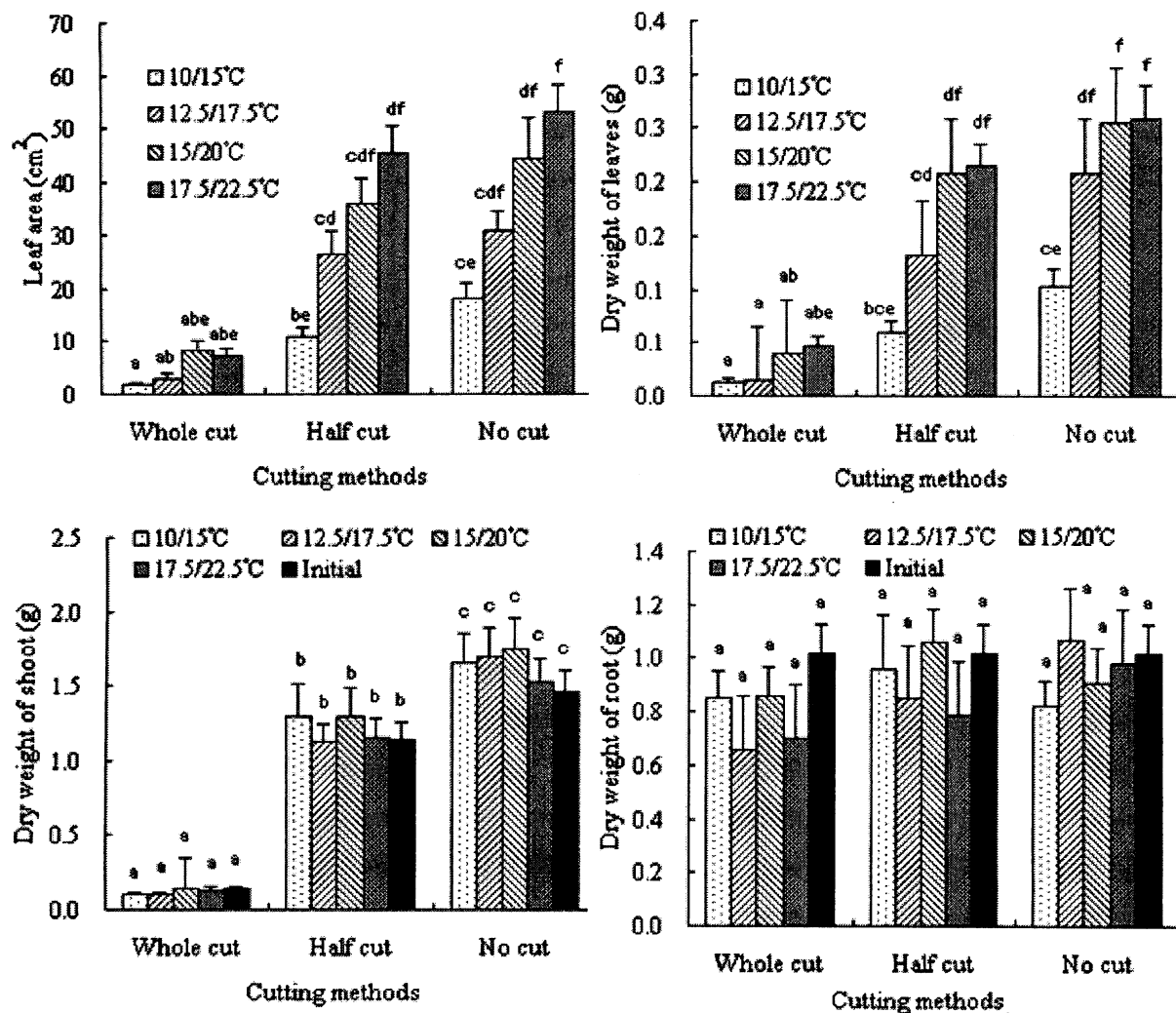


図 10 さまざまな切除処理[全ての葉のみをを除去する(対照=No cut)、全ての葉を除去した上で幹の上部半分ほどを除去する(半除去=Half cut)、地上部分の葉と幹部分の全てを除去する(全除去=Hall cut)]を施した上で、異なる温度条件に制御された4つの環境制御チャンパー内で4週間生育した *Artemisia ordosica* の葉面積(左上)、葉の乾燥重量(右上)、幹枝の乾燥重量(左下)および根の乾燥重量(右下)の平均値±SE 異なる文字を付したバーは、相互間で有意な差がある(p<0.05)ことを示す。

表 2 *Artemisia ordosica* の葉の面積 (a)、葉の乾燥重量 (b)、幹の乾燥重量 (c)、および根の乾燥重量 (d) の二元配置 ANOVA の結果

表 2a

環境要因	Df	MS	F
温度 (T)	3	0.483	27.949***
処理方法 (C)	2	2.144	124.116***
T × C	6	0.026	1.488 ^{ns}
誤差	132	0.017	

表 2b

環境要因	Df	MS	F
温度 (T)	3	0.002	24.593***
処理方法 (C)	2	0.011	124.235***
T × C	6	0.0002	1.772 ^{ns}
誤差	132	0.00009	

表 2c

環境要因	Df	MS	F
温度 (T)	4	0.118	0.540 ^{ns}
処理方法 (C)	2	123.263	565.446***
T × C	8	0.091	0.419 ^{ns}
誤差	165	0.218	

表 2d

環境要因	Df	MS	F
温度 (T)	4	0.0007	1.543 ^{ns}
処理方法 (C)	2	0.001	2.114 ^{ns}
T × C	8	0.0004	0.832 ^{ns}
誤差	165	0.0005	

注：***は P<0.001 を意味する。ns は「有意差なし」を意味する。

幹枝の全除去処理によって再生する葉の面積と乾燥重量が大幅に減少したが、半除去処理された苗木では、対照苗木とほぼ同程度の生長を示した。現地における実用的な苗木移植に際しては、半除去処理は、何も処理しない苗木と比べ、多量の水分の蒸発を抑制だけでなく、その後の葉の再生を妨げないので、移植後の苗木にとって良好な状態が維持される。このため、半除去処理が現地における苗木移植の前処理としては適していると判断された。苗木の再生を大きく抑制した 10:15℃(夜間：昼間)の条件は、ムウス沙地の初春の気温条件であり(図 3)、この時期におけ

る移植は危険が伴うことを示唆する。一方、苗木の生長が最も良好であった 17.5:22.5°C (夜間：昼間) の条件は、ムウス沙地の夏の天候とほぼ同じである (図 3)。したがって、苗木移植は夏季に実施するのが良いとの結論に達する。しかし、生態学的には土壤水分量が大きな制限要因になると思われる。夏季は、降水量が多いものの、多量の水分が蒸発するので、春季後半の苗木移植が比較的良い選択であろうと思われる。

⑥ 異なる水分環境 (給水条件) での植物の生長実験

砂漠化地域での緑化に用いられる 4 種の植物 (*Artemisia ordosica*, *Artemisia sphaerocephala*, *Caragana korshinskii*, *Hedysarum fruticosum*) の実生植物を材料に、異なる量の給水処理 (3 日おきに 3.75 mm、7.5 mm、11.25 mm および 15 mm) を行って、ほぼ 8 週間育成し、それらの生長量を比較した。

図 11 に、実験前および各給水処理後の 4 種の植物の葉の乾燥重量を示す。これらの植物種の給水量に対する反応特性は 2 つのタイプに類型化できた。すなわち、本実験範囲では、*Artemisia ordosica* および *Artemisia sphaerocephala* では、給水量の増加とともに葉の乾燥重量が増加したのに対し、*Caragana korshinskii* および *Hedysarum fruticosum* では、給水量が 112.5 mm で頭打ちとなり、これ以上給水量を増やしても葉の乾燥重量の増加は認められなかった。生長量そのものは、*Artemisia ordosica* および *Artemisia sphaerocephala* の方が他の 2 植物種に比べて大きかったが、給水量との関係を見ると、*Artemisia* 属の植物種は水分状態が良くなるにつれて生長量が増し、より広範な環境条件に適応可能であることが分かった。

一方、*Caragana korshinskii* および *Hedysarum fruticosum* では、一月当たりの降水量に換算すると、100 mm で生長が飽和しており、これはムウス沙地における平均的な夏期 (7~8 月) の降水量に匹敵する (図 3)。これらの植物種はムウス沙地の環境条件に比較的適した植物種であると考えられる。

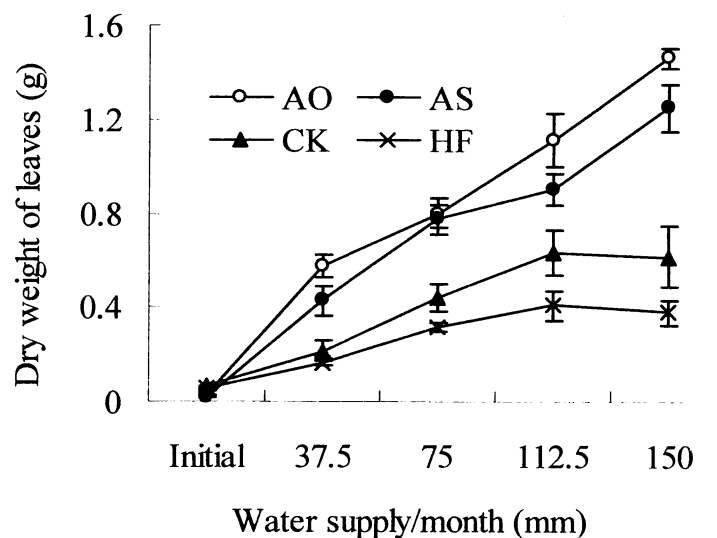


図 11 異なる給水条件のもとで栽培したときの *Artemisia ordosica* (AO)、*Artemisia sphaerocephala* (AS)、*Caragana korshinskii* (CK) および *Hedysarum fruticosum* (HF) の葉の乾燥重量 (mean ± SE)

5. 本研究により得られた成果

本サブテーマでは、サブテーマ1およびサブテーマ4などの情報を考慮しつつ、特にサブテーマ2の指標植物の研究者の協力を得て情報収集や植物実験を行った。まず、砂漠化からの回復に関連する文献情報の収集および整理を行い、その結果得られた文献情報のデータベース化を行った。また、ムウス沙地の砂漠化した砂地の緑化に用いられている植物9種(*Agriophyllum squarrosum*、*Artemisia ordosica*、*Artemisia sphaerocephala*、*Astragalus adsurgens*、*Caragana intermedia*、*Caragana korshinskii*、*Glycyrrhiza uralensis*、*Hedysarum fruticosum*、*Medicago sativa*)に関し、種子発芽や実生の生長等に関する環境制御実験を行い、各植物の生理生態的特性(光強度、温度、水分条件などの環境要因の単独・複合影響)について新たな知見を得た。なお、ここで用いた植物種のいくつかは、砂漠化地域の緑化植物種であると同時に同地域の植物指標種でもあり、植物指標に関する基盤データの充実に貢献した。

実験結果では、①砂漠化地域の多くの植物種の発芽には光照射は必要なく、いくつかの種(*Agriophyllum squarrosum*、*Artemisia sphaerocephala*、*Artemisia ordosica*)では種子発芽の光阻害が認められた。②広範囲の温度に対し比較的一様な発芽反応を示す植物種(*Caragana intermedia*)がある一方で、高温や低温で顕著に種子発芽が抑制される種(*Artemisia ordosica*)も存在した。後者では、光と温度の複合効果も認められた。③水ストレスの種子発芽影響に関して、比較的強い種(*Astragalus adsurgens*)、弱い種(*Artemisia ordosica*)があるが、後者では、特に高温時や低温時に影響が大きく現れた。④実際の砂地においては種子は砂に被われるが、被覆がある深さ(0.5 cm)の場合にのみ良く実生が出現する種(*Agriophyllum squarrosum*、*Artemisia sphaerocephala*、*Artemisia ordosica*)と実生出現可能な範囲が比較的広い種(*Caragana korshinskii*、*Hedysarum fruticosum*、*Medicago sativa*)があり、野外では、光、温度、水分要因以外にも砂の被覆による物理的効果が種子発芽・実生の出現に影響していることが推察された。⑤苗木移植による緑化の基礎的知見として、3植物種(*Artemisia ordosica*、*Artemisia sphaerocephala*、*Medicago sativa*)の苗木の幹枝の除去量を変えたところ、半分ほど除去した状態がこれらの植物では植栽後の葉形成が良好となることを示した。⑥4種の植物実生(*Artemisia ordosica*、*A. sphaerocephala*、*Caragana korshinskii*および*Hedysarum fruticosum*)の生長に及ぼす水分環境の影響では、2種の*Artemisia*属は水分環境が良いほど生長は良かったが、他の2種はより乾燥した条件の緑化に適することが明らかとなった。

これらの結果から、各々の環境要因に対する反応性、各植物種の生理生態特性が明らかになり、飛行機播種や苗木移植に関して、その時期や地域環境、前処理などを考える際の情報整備ができた。これらの情報はムウス沙地に限らず、中国各地の砂漠化地域の緑化を行ううえでの有用な知見となると期待される。

6. 引用文献

- 1) J.D. Bewley, M. Blank. 1994. *Seeds: Physiology of development and germination*. London: Plenum Press.
- 2) China National Committee for the Implementation of the UN Convention to Combat Desertification. 1996. *Traditional Knowledge and Practical Techniques for Combating Desertification in China*. China Forestry Press House, Beijing, p.5-20.

- 3) X.J. Dong, B.Z. Yang. 1994. Study on characteristics of water ecophysiology for several plants in sandy land. *Acta Phytoecologica Sinica*, 21: 208-225.
- 4) X.J. Dong, X.S. Zhang, B.Z. Yang. 1997. A preliminary studies on the water balance of some sandy shrubs based on transpiration measurements in filed conditions. *Acta Phytoecologica Sinica*, 21: 208-225.
- 5) X.J. Dong. 1997. Experimental Measurement of the Water Relations Parameters of Nine Shrubs and Some Ecological Interpretations. *Acta Botanica Sinica*, 40: 657-664.
- 6) B. Gul, D.J. Weber. 1999. Effects of salinity, light and temperature on germination in *Allenrolfea occidentalis*. *Canadian Journal of Botany*, 77: 240-246.
- 7) S. Gulzar, M.A. Khan. 2001. Seed germination of halophytic grass *Aeluropus lagopoides*. *Annals of Botany*, 87: 319-324.
- 8) Y. Gutterman. 1993. *Seed germination of desert plants*. Springer-Verlag, Berlin.
- 9) G.M. Jiang, W.M. He. 1999. Species and habitat-variability of photosynthesis, transpiration and water use efficiency of different plant species in Maowusu sand area. *Acta Botanica Sinica*, 41: 1114-1124.
- 10) M.A. Khan, I.A. Ungar. 1997. Effects of light, salinity, and thermoperiod on the seed germination of halophytes. *Canadian Journal of Botany*, 75: 835-841.
- 11) J. Qi (Ed.). 1998. *Aerial sowing for sand control in China*. Science Press, Beijing. 216 pp.
- 12) K. Tobe, X. Li, K. Omasa. 2000. Seed germination and radicle growth of a halophyte, *Kalidium caspicum* (Chenopodiaceae). *Annals of Botany*, 85: 391-396.
- 13) Y. Wen. 1992. A study on the effect of rainfall on arial seeding. *Collected Papers of the Maowusu Sands Exploitation and Control Research Centre*. Inner Mongolia University Press, Hohhot, China, p. 43-46.
- 14) B.Z. Yang, X.J. Dong, Q. Gao, Z.M. Liu, B. Alateng. 1994. A study on the transpiration and water deficit regime of the Artemisia Ordosica Community. *Acta Phytoecologica Sinica*, 18: 160-170.
- 15) Y. Zha, J. Gao. 1997. Characteristics of desertification and its rehabilitation in China. *Journal of Arid Environments*, 37: 419-432.
- 16) J. Zhang, M.A. Maun. 1990a. Effects of sand burial on seed germination, seedling emergence, survival, and growth of *Agropyron psammophilum*. *Canadian Journal of Botany*, 68: 304-310.
- 17) J. Zhang, and M.A. Maun. 1990b. Sand burial effects on seed germination, seedling emergence and establishment of *Panicum virgatum*. *Holarctic Ecology*, 13: 56-61.
- 18) S. Zhao, H. Liu. 1989. Shrublands of China. *The Biology and Utilization of Shrubs* (C.M. McKell, ed.), Academic Press, San Diago, p. 225-245.
- 19) Y. Zheng. 1998. Study on the water ecophysiological characteristics of several plant species in Mu Us sandland. *Arid Zone Ressearch*, 15:17-21.

7. 国際共同研究等の状況

本研究は、地球環境研究総合推進費の国際交流研究制度(Eco-Fronteer Fellowship Program)により実施されたものである。また、本研究は中国科学院植物研究所との共同研究であり、当該研究機関から本研究を実施するうえで必要な情報や資料、さらには実験用の植物種子などの提供を受

けた。また、これ以外にも、内蒙古農業大学、北京師範大学、中国林業科学研究所、中国科学院寒区旱区環境与行程研究所等の研究者の協力を得て実施した。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

<学術誌 (査読あり) >

- ① Y. Hu, S. Sun, Y. Zheng: Beijing Science Press (2002) “Interactions between sparse vegetation and atmosphere”
- ② G. Li and Y. Zheng: Journal of Environmental Sciences, 14 (4), 568-675 (2002) ”The Characteristics of Regional Climate Change and Pattern Analysis on Ordos Plateau.”
- ③ Y. Zheng, Z.X. Xie, Y. Gao, H. Shimizu, L.H. Jiang and Y. Yu: Belgian Journal of Botany, 136(2): 129-138 (2003) “Ecological restoration in northern china: germination characteristics of 9 key species in relation to air seeding”.
- ④ L.H. Jiang, J.Z. Wang and Y. Zheng: Acta Botanica Yunnanica, 26(2): 166-172 (2004) “Foliage projective cover, effective tool for describing structure of plant communities”.
- ⑤ Y. Zheng, A. Specht and H. Shimizu: Journal of Arid Environments (in press) “Desertification: Towards Integrated Management.”
- ⑥ L.H. Jiang, J.Z. Wang and Y. Zheng: Arid Zone Research (in press) “Restoration of degraded ecosystem and regional social economic development in the Ordos Plateau”.
- ⑦ Y. Zheng, Z.X. Xie, L.H. Jiang and H. Shimizu: Journal of Arid Environment (accepted) “Changes of Holdridge life zone diversity in Xinjiang Uygur Autonomous Region (XUAR) of China over the past forty years”.
- ⑧ Y. Zheng, Z.X. Xie, Y. Gao, Y. Yu and H. Shimizu: South Africa Journal of Botany (accepted) “Influence of light, temperature and water stress on germination of *Hedysarum fruticosum*.”

<学術誌 (査読なし) >

- ① Y. Zheng: Integration and Regional Researches to Combat Desertification, -Present Status and Future Prospect- The 16th Global Environment Tsukuba, (H. Shimizu, ed. pp.392) Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Japan (ISSN 1341-4356), 192-195 (2002) “The optimized pattern for desertification combating in the Ordos Plateau China.”

<書籍 >

なし

<報告書類等 >

なし

(2) 口頭発表

- ① Y. Zheng, H. Shimizu, Y. Gao, P. An, Y. Yu, Y. Yu and K. Tobe: 67th Annual Meeting of the Botanical Society of Japan, Sapporo, Japan (September, 2003) “Germination and regeneration characteristics of some plant species grown in desertified Mu Us sandy land, China”.
- ② Y. Zheng, Y. Yu, Y. Gao, H. Shimizu, K. Tobe, Y. Yu, P. An and G.Y. Qiu: International symposium: Evaluation and monitoring of desertification – Synthetic activities for the contribution to UNCCD. Tsukuba, Japan (February, 2004) “Improvement on countermeasures: towards integrated desertification combating.”
- ③ Y. Yu, H. Shimizu, Y. Zheng, Y. Gao, P. An and Y. Yu: International symposium: Evaluation and monitoring of desertification – Synthetic activities for the contribution to UNCCD. Tsukuba, Japan (February, 2004) “Influence of light, temperature on seed germination of some plant species in Horqin sandy-land”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後も本研究の成果である砂漠化回復のための緑化植物／指標植物の特性などの基盤情報を提示し、国連砂漠化対処条約(UNCCD)の科学技術委員会(CST)および砂漠化対処条約アジア地域テーマ別プログラムネットワーク 1 (TPN1)の活動に貢献する。また、中国砂漠化対処条約実施委員会(CCICCD)の活動や中国の砂漠化問題に関連する日本の活動、特に砂漠化地域の植生回復／緑化分野に貢献する。