異なる塩ストレス下におけるアブラマツ (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 苗木の生存及び成長と菌根形成

田中一平¹⁾・谷口武士¹⁾・二井一禎²⁾・山中典和¹⁾

1) 鳥取大学乾燥地研究センター Arid Land Research Center, Tottori Univ.

2) 京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto Univ.

摘要: 半乾燥地緑化に用いられているアブラマツ (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 苗木の塩ストレス耐性について実験を行った。実験は1年生のアブラマツ実生を用い、0, 25, 50, 100 mMの4段階のNaCl水を3日に一度与え、130日間生育させた。耐塩性は生存率、現存量、菌根化率より評価を行った。結果より、塩濃度50および100 mM区では実験開始2ヵ月後にはほとんどの個体が枯死した。生存している個体では塩濃度の上昇に伴い、現存量の低下がみられた。また、根には菌根共生がみられたが、塩ストレスによって菌根化率の減少がみられた。今回の実験よりアブラマツ苗木が生育可能な地域は、土壌のNa⁺量が30 mg/100 g以下の地域であることが示唆された。

キーワード: アブラマツ, 塩ストレス, 外生菌根, 半乾燥地, 実生の生残

TANAKA, Ippei, TANIGUCHI, Takeshi, FUTAI, Kazuyoshi, and YAMANAKA, Norikazu: **Survival, growth and ectomycorrhizal colonization of *Pinus tabulaeformis* Carr. seedlings under different salt stress.**

Abstract: *Pinus tabulaeformis* Carr. has been planted for revegetation in semiarid lands. We investigated the effects of salt stress on seedlings. Four concentrations of NaCl salt water (0, 25, 50, 100 mM) were added to the seedlings at three-days intervals for 130 days. In order to evaluate the Salt tolerance, survival rate and ectomycorrhizal colonization, biomass of the seedlings were examined. Almost 100% of the seedlings were died at 50 and 100 mM NaCl treatments in two months. Biomass of the surviving seedlings was reduced with increasing NaCl stress. Ectomycorrhizal colonization was also reduced with increasing NaCl stress. This study indicates that *Pinus tabulaeformis* seedlings can survive below 30 mg/100 g soil of sodium concentration.

Key words: *Pinus tabulaeformis* Carr, salt-stress, ectomycorrhiza, semiarid land, seedling survival

1. はじめに

近年、乾燥地域における砂漠化が問題となっている。植生の破壊や土壌劣化により砂漠化が進行し、その結果、人々の暮らしに多大な被害が出ている。このような問題を解決するために樹木を用いた緑化活動が行われている。しかし、乾燥地域において緑化を行う際には克服しなければならない問題が数多くあり、その中の一つが土壌の塩類化である。UNEP (2002)によると、世界全体の灌漑耕地2億5500万haのうち、1億500万~1億1000万haが塩害を受けているとされている¹⁾。このような塩類土壌では植物の生育は著しく阻害される。植物の生育に適さない土地で緑化活動を行う場合、使用する樹木の環境ストレス耐性などの基礎的な研究データを収集し、その種の生存や成長にかかわる諸特性を明らかにしておくことが大切である¹²⁾。

アブラマツ (*Pinus tabulaeformis* Carr.) は中国の半乾燥

地緑化に広く用いられている樹種であり、主に山岳地域で植えられることが多い⁴⁾。しかし、低地においても都市緑化に使用される場合があり、半乾燥地域に位置する内蒙古自治区では道路沿いにアブラマツがよく植樹されている。そのような場所では不適切な灌漑による土壌の塩類集積が起こることもあり、樹木は塩の影響を受ける場合がある。しかし、アブラマツなど緑化に利用されているマツ類の耐塩性についての報告は少ないのが現状である^{7,9)}。そのため本実験では、緑化に広く利用されているアブラマツ苗木の耐塩性を評価するために塩灌水実験を行った。

一般的にマツ類などは菌根を形成する樹木である。このような菌根菌と樹木との共生関係は、養分条件や水分条件が植生や個々の樹木の定着の制限要因となる場合、非常に大きな効果を発揮する。従って、貧栄養で水分が不足する乾燥地では菌根共生を利用することによって、大きな効果が得られると考えられる。そのため、植物の耐塩性実験を行う場合、菌

根共生下における樹木の応答をみていくことは、緑化に菌根共生を利用するにあたり不可欠である。一般的に菌根を用いた樹木の耐塩性実験では、塩濃度が上昇するにつれて菌根化率が減少したという報告もあり^{2,3,8)}、土壌中の過剰な塩は樹木だけでなく菌根へも影響を及ぼすと考えられる。そのため、菌根菌を利用した緑化を行うためには、菌根共生下で塩ストレスが植物にどのような影響を与えるかに加え、菌根共生に塩ストレスを与える影響を調べる必要がある。

以上の背景から、自然条件下において育成したアブラマツ実生苗を用い、異なる濃度の塩水を与え栽培を行ない、植物現存量や枯死パターン、生存率、菌根化率を調査し、菌根共生下にあるアブラマツ苗木の耐塩性と、菌根共生への塩ストレスの影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験材料

アブラマツは、マツ科の常緑高木であり、樹高は 25 m、直径は 1 m に達する。針葉は 2 枚で、2 葉松の仲間に入る。分布は広く北は遼寧章、南は四川省、西は青海省まで分布し、中国華北地域を代表する樹種の一つである¹⁰⁾。また、耐乾、耐寒性に優れ、貧栄養な土地でも生育することができ⁴⁾、そういったストレス耐性の高さから中国の緑化活動にも広く用いられている。

3. 実験方法

3.1 育苗方法

実験には鳥取大学乾燥地研究センター内の砂丘にて採取した砂丘砂を用いた。砂丘砂を、防水処理を施した紙容器 (7×7×20 cm) に充填し、2006 年 3 月に中国内蒙古自治区産のアブラマツの種子をまいた。発芽した苗木は容器当たり 1 本に調整し、センター内の圃場にて約 1 年間生育させたのち実験を行った。この間肥料は与えていない。

3.2 塩灌水実験

乾燥地研究センター内のビニールハウスにおいて、2007 年 4 月 20 日より塩灌水実験を開始した。地温の上昇を防ぐため、松実生苗を植えた容器を、土中に埋めた状態で実験を行った。

塩ストレスは 0 mM、25 mM、50 mM、100 mM の 4 段階の濃度の NaCl 溶液を、3 日に 1 度の頻度で毎回各容器に 100 cc 投与した。繰り返しはそれぞれの処理ごとに 7 回とした。

実験開始前、及び実験開始から 40 日後、90 日後、130 日後に土壌及び植物体のサンプリングを行った。ただし、植物体が枯死した容器からの土壌のサンプリングは行っていない。

3.3 土壌分析

植栽容器中の土壌を混ぜ合わせ、一部を分析試料とした。採取した土壌は 80℃ に設定した乾燥機 (DN810, DN83, ヤマト科学株式会社) にて 48 時間以上乾燥させた。その後、土

表-1 葉の変色段階

Table 1 Leaf condition level

段階 Level	葉の変色の程度 Leaf condition
0	全ての葉が緑色
1	黄色や紫色に一部変色 (50%以下)
2	50%以上黄色に変色
3	茶色の葉が出現 (30%以下)
4	茶色の葉が出現 (60%以下)
5	茶色の葉が出現 (90%以下)
6	枯死 (全ての葉が茶色に変色)

壤試料と水を質量比 1 : 5 で配合した土壌溶液を作成した。その溶液を用い EC の測定 (CM-40S 電導度計, 東亜電波工業株式会社) を行った。次に、先の土壌溶液をろ過し、原子吸光度計 (AA-6700S, 島津製作所) を用いて Na^+ 、及び K^+ の定量を行い、単位土壌乾重当りに含まれる塩分量を算出した。

3.4 枯死パターンおよび生存率

アブラマツ苗木の枯死過程として、130 日後に掘り取る個体 (各処理 7 本づつ) を対象に 10 日おきに、表-1 に示した指標をもとに葉の変色過程を目視で調査した。調査期間は 2007 年 4 月 20 日～8 月 31 日までとした。10 日おきに植物の生残の確認を行い、繰り返し 7 個体のうち生存していた個体数の割合を生残数として示した。枯死の判断は表-1 に基づき、すべての葉が茶色に変色した状態を枯死とした。

3.5 植物の成長量

130 日後に掘り取る個体 (各処理 7 本づつ) を対象に、2 週間に 1 度の頻度で地際直径及び樹高の測定を行った。

地際直径はデジタルダイヤルゲージ (Digimatic Cliper, ミットヨ株式会社) を用いて 2 方向からそれぞれ測定し、2 方向の平均値を求めた。樹高は地際から頂端までの長さを測定した。そして、測定した値を用い毎回の測定値から実験開始時の値を引いたものを成長量とし、植物の成長の指標とした。実験開始時における苗木の樹高及び地際直径はそれぞれ次のようであり (樹高 : 0 mM:4.14±0.30 cm, 25 mM:3.89±0.19 cm, 50 mM:4.38±0.38 cm, 100 mM:4.11±0.37 cm, 地際直径 : 0 mM:1.05±0.03 mm, 25 mM:0.99±0.07 mm, 50 mM:1.00±0.09 mm, 100 mM:1.11±0.08 mm), 処理間で有意な差は認められなかった (Sheffe test, $p>0.05$)。

3.6 植物体現存量

掘り取った植物体は 80℃ に設定した乾燥機にて 48 時間乾燥させ、乾燥重量を測定した。

3.7 菌根化率

植物体の掘り取り時に、長さ 5 cm の根を個体当たり 3 箇所から採取し、目視で色による根の生死判定を行った後、生きている部分について 70 %エタノールに漬けて保存した。そして、実体顕微鏡 (EMZ-5TR/10, メイジテクノ株式会社) 下で、全根端数及び菌根化した根端数を数え、菌根化率を求めた。以下に菌根化率の計算式を示す。

図-1 土壌中のNa⁺量。塩灌水処理前 (a), 40日後 (b), 70日後 (c), 100日後 (d), 130日後 (e)。図中の縦線は標準誤差。異なるアルファベットは処理区間で有意差があることを示す (Scheffe test, $p < 0.05$)。N.D.: データなし。

Fig.1 Na⁺ concentration in soils. Non-stress (a), 40 days later (b), 70 days later (c), 100 days later (d), 130 days later (e). Bars indicate standard errors. Different letters indicate significant differences among four treatments (Scheffe test $p < 0.05$). N.D.: No data

図-2 土壌中のK⁺量。塩灌水処理前 (a), 40日後 (b), 70日後 (c), 100日後 (d), 130日後 (e)。図中の縦線は標準誤差。異なるアルファベットは処理区間で有意差があることを示す (Scheffe test, $p < 0.05$)。N.D.: データなし。

Fig.2 K⁺ concentration in soils. Non-stress (a), 40 days later (b), 70 days later (c), 100 days later (d), 130 days later (e). Bars indicate standard errors. Different letters indicate significant differences among four treatments (Scheffe test $p < 0.05$). N.D.: No data

$$\text{菌根化率 (\%)} = (\text{感染根端数} / \text{全根端数}) \times 100$$

4. 結果

4.1 土壌分析

図-1 に土壌のNa⁺の値を、図-2 にK⁺の値を示す。Na⁺の値はいずれのサンプリング時期においても、0 mM区では1~5 mg/100 g, 25 mM区では20~35 mg/100 g, 50 mM区では35~50 mg/100 g, 100 mM区では50~55 mg/100 gを示し、塩水中の塩濃度が高くなるに伴い土壌中のNa⁺値も高くなる傾向を示した (図-1)。特に、いずれのサンプリング時期においても0 mM区と25 mM区、さらには100 mM区の間では有意な差が認められた (Scheffe test, $p < 0.05$)。K⁺の値はどの処理区でも0.4~0.8 mg/100 gの値を示し、掘り取り時期及び塩灌水処理による大きな違いはみられていない (図-2)。40日後ではすべての処理区間、70日後ではサンプル数が十分でない100 mM区を除き有意差は認められていない (Scheffe test, $p > 0.05$)。ECの値はNa⁺の変化とほぼ対応して塩灌水処理濃度が上がるに伴い上昇する傾向を示し、

0 mM区では1~3 mS/m, 25 mM区では25~30 mS/m, 50 mM区では40~50 mS/m, 100 mM区では50~70 mS/mとなった。

4.2 塩ストレス下での葉の変色過程及び植物体の生残過程

塩処理濃度ごとに葉の変色過程をみると100 mM区では実験開始直後から葉の変色がみられ、最も速く変色が進行した (図-3)。次に50 mM区での変色の進行が速かった。25 mM区では110日目までは変色はあまりみられなかったが、120~130日後にかけ変色が進行した。0 mMでは葉の変色はみられなかった。実験開始20日以降では塩処理間で葉の変色段階に有意な差がみられた (Kruskal-Wallis test, $p < 0.05$)

最終掘り取り個体における生残過程をみると (図-4), 100 mM区では最も早い時期から枯死個体が出現し、実験開始から60日後に枯死個体が見られた。50 mM区では80日後、25 mM区では130日後から枯死個体が出現し、実験の進行に伴い、塩濃度の高い処理区ほど生残率は減少していった。最終的には100 mM区及び50 mM区ではすべての個体が枯死した。0 mM区では枯死個体はみられなかった。

図-3 塩ストレス下における葉の変色段階。図中の縦線は標準誤差。アスタリスクは処理区間で有意差があることを示す (Kruskal-Wallis test, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)。

Fig.3 Changes in leaf condition of *Pinus tabulaeformis* under different salt stress. Bars indicate standard errors. Asterisks indicate significant differences among four treatments (Kruskal-Wallis test, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$) .

図-4 塩ストレス下における苗木の生残過程

Fig.4 Survival process of *Pinus tabulaeformis* under different salt stress.

◆ 0 mM □ 25 mM ▲ 50 mM ○ 100 mM

図-5 塩ストレス下におけるアブラマツの積算樹高成長量 (a) および積算地際直径成長量 (b)。図中の縦線は標準誤差。異なるアルファベットは処理区間で有意差があることを示す (Scheffe test, $p < 0.05$)。

Fig.5 Height (a) and diameter (b) increment of *Pinus tabulaeformis* under different salt stress. Bars indicate standard errors. Different letters indicate significant differences among four treatments (Scheffe test, $p < 0.05$).

4.3 塩ストレスが成長量へおよぼす影響

図-5 に塩ストレス下におけるアブラマツ苗木の積算樹高成長過程 (a) 及び積算地際直径成長過程 (b) の経時変化を示す。積算樹高成長量において調査最終日には 0 mM 区と 25 mM 区の値がほぼ同じとなった。また、調査期間を通じてみると成長量は塩灌水濃度が高まるに従い低下する傾向を示したが、ばらつきが大きく、処理間において有意差は認められなかった (Scheffe test, $p > 0.05$)。

次に積算地際直径では調査最終日の値では 0 mM 区の値が最も高く、25 mM 区の値が最も低くなった (図-5 (b))。また、これらの値は有意に異なっていた (Scheffe test, $p < 0.05$)。

4.4 塩ストレスが現存量へおよぼす影響

表-2 に塩ストレス下における苗木の現存量を示す。各サンプリング時期において現存量は塩灌水濃度が高くなるに伴い低下する傾向がみられた。また現存量は塩灌水濃度に関わら

表-2 異なる塩ストレス下における苗木の現存量 (g)

Table 2 Total dry weight of *Pinus tabulaeformis* seedlings under different salt stress

	塩水処理前 Non-stress	40日後 40 days later	70日後 70 days later	100日後 100 days later	130日後 130 days later
0 mM	0.379 ± 0.018	0.573 ± 0.037 a	0.533 ± 0.072 a	0.573 ± 0.050 a	0.491 ± 0.050 a
25 mM		0.450 ± 0.033 a	0.492 ± 0.045 a	0.378 ± 0.029 b	0.291 ± 0.148 a
50 mM		0.453 ± 0.051 a	0.323 ± 0.032 a	0.482 ± 0.047 ab	N.D.
100 mM		0.429 ± 0.049 a	0.510	N.D.	N.D.

(mean±s.e.)

異なるアルファベットは処理区間で有意差があることを示す(Scheffe test, $p<0.05$)。N.D.: データなし。Different letters indicate significant differences among four treatments(Scheffe test $p<0.05$). N.D.: No data.

表-3 異なる塩ストレス下における菌根化率 (%)

Table 3 Ectomycorrhizal colonization (%) of *Pinus tabulaeformis* under different salt stress

	塩水処理前 Non-stress	40日後 40 days later	70日後 70 days later	100日後 100 days later	130日後 130 days later
0mM	56.3 ± 4.9	73.0 ± 2.5 a	68.9 ± 5.5 a	61.0 ± 3.9 a	50.1 ± 4.4 a
25mM		76.0 ± 2.3 a	63.6 ± 4.9 a	54.5 ± 3.6 a	50.2 ± 11.5 a
50mM		55.9 ± 4.4 b	60.6 ± 4.8 a	60.2 ± 5.9 a	N.D.
100mM		60.5 ± 3.5 ab	55.0	N.D.	N.D.

(mean±s.e.)

異なるアルファベットは処理区間で有意差があることを示す (Scheffe test, $p<0.05$)。N.D.:データなし。Different letters indicate significant differences among four treatments (Scheffe test $p<0.05$) . N.D.: No data.

ず、塩水処理前に比べて有意に 40 日後の値は高くなった (T-test, $p<0.05$) (表-2)。しかし 40 日後以降の塩水濃度においても現存量は減少する傾向がみられた。

4-5 塩ストレスが菌根へおよぼす影響

表-3 に塩ストレス下における菌根化率を示す。塩水処理前を含め、いずれの処理区においても菌根化率は 50%以上の値を示した (表-3)。しかし、各掘り取り時期において塩水濃度が高くなるに伴い菌根化率も減少する傾向を示し、40 日後では 50 mM 区で菌根化率が有意に低かった (Scheffe test, $p<0.05$)。また、0 mM 区と 25 mM 区では実験の進行に伴い、菌根化率が低下する傾向が認められた。しかし、50 mM 区ではほとんど菌根化率の低下は認められなかった。

5. 考察

今回の実験では塩水によって土壌の Na^+ の値が段階的に変化した。このため本実験では異なる土壌中の塩濃度下でのアブラマツ苗木の反応を評価することができた (図-1)。塩処理による植物体への影響として、塩濃度の上昇に伴い枯死の進行の促進や、生存率の低下、現存量の減少がみられた

(図-3, 表-2)。これらから、塩ストレスはアブラマツ苗木の成長、生存に悪影響を及ぼし、高塩濃度処理ほど影響は大きくなった。また、樹高成長量および地際直径成長量においても塩濃度が高い処理ほど成長量も小さくなる傾向を示したが、ばらつきが大きく、塩濃度と成長量には明確な関係性は認められなかった (図-5)。

本実験に用いたアブラマツ苗木と他の針葉樹の耐塩性について比較を行い、アブラマツ苗木の持つ耐塩性の位置づけを試みた。針葉樹に関して耐塩性の検討を行った研究は少ないが、本実験と比較しうる実験方法を用いた研究結果として、ロジボールパイン (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Englem), バンクスマツ (*Pinus banksiana* Lamb.), ホワイトスプルース (*Picea glauca* (Moench) Voss) の 3 樹種における耐塩性の程度が報告されている⁵⁾。この研究結果によると、実験開始 30 日後における生残率として、ホワイトスプルースでは 0 mM 区以外では 0%であったのに対し、ロジボールパインでは 25 mM 区でも約 45%であり、より高い塩濃度下での生残率は 0%となっている。バンクスマツは 0 mM では 100%, 25 mM 区では約 25%, 50 mM では 20%, 75 mM 区では約 15%となっている。これらの結果と比較

すると、アブラマツ苗木では塩処理後30日時点での0, 25, 50, 100 mM区におけるそれぞれの生残率は100%を示している(図-4)。実験に用いた土壌条件等、様々な違いがあるが、本研究の結果、アブラマツ苗木は先行研究で示された針葉樹よりも生存率が高く、耐塩性が高い可能性が示唆された。

アブラマツ苗木の生残率と塩灌水濃度からアブラマツ苗木が生存可能な土壌塩分量を検討した。最終的な生存率では50 mM区と100 mM区の個体はすべて枯死し、25 mM区では43%の生存率を示している。さらに50, 100 mM区では70~80日後には枯死個体がみられたのに対し25 mM区では実験終了間際の120日後まで枯死個体はみられていない(図-4)。しかし、25 mM処理区でも実験開始後120日以降に枯死や葉の変色も増えていることから、実験期間をさらに長くすると個体全体が枯死する可能性も考えられる。これらのことから、アブラマツ苗木にとって、塩灌水濃度25 mM(土壌中のNa⁺濃度20-30 mg/100 g)付近が生育の限界に近いものと推定される。

中国内蒙古自治区内で、実際に塩類集積が生じている場所の例として、内蒙古自治区の河套灌区(除塩灌漑に伴う排水不良による塩類集積が広がっている地域)があげられるが、ここで報告されているECの値は80 mS/m⁶⁾である。これは本実験の100 mM区で示された値(50~70 mS/m)よりも若干高い値となっている。本実験はポット実験であり、野外条件との直接的な比較は適当でないが、高塩濃度下でのアブラマツ苗木の生存は難しいと考えられることから、実際の塩類集積地におけるアブラマツ苗木の使用は難しく、塩の影響がごく小さい場所でのみ限定的に生育が可能であると思われる。

また、今回の実験では実験に用いた全個体において菌根の形成が確認された(表-3)。滅菌処理を行っていない土壌を用いたため、日本の土着の菌根菌による菌根が形成されたものと思われる。また、塩ストレスによる影響としては、菌根化率は塩濃度の上昇に伴い減少する傾向がみられ、これは既存の菌根共生の耐塩性実験の結果と一致する^{2, 3, 8)}。

しかし、本実験では塩灌水処理区においても50%以上の高い菌根化率がみられた。塩ストレスにさらされる海岸砂丘では、耐塩性に優れた菌が優占していると考えられるが、海岸砂丘から採取した土壌にはこのような菌が存在していたと考えられる。今回の試験では、このような土壌中の菌がアブラマツ苗木と共生したため、塩ストレスにかかわらず、菌根化率が維持されたと考えられる。しかしながら、この高い菌根化率にかかわらず、アブラマツ苗木の枯死が認められた。このことは、今回の試験において、強度の塩ストレス、あるいは長期にわたる塩ストレスから菌根菌が植物を完全に守ることはできなかったことを示している。しかし、今回の試験で

も菌根菌の存在で枯死が緩和されていた可能性はあり、今後、菌根菌の有無でアブラマツ苗木の耐塩性がどのように変化するのにかに関する調査が必要である。本実験では、土着の様々な菌根菌種による菌根の形成がみられたが、それぞれの種の同定は出来なかった。そのため菌根菌の種類ごとに植物へ及ぼす影響を把握することは出来なかった。今後の課題として、特定の菌と樹木との共生関係への塩ストレスへの影響を明らかにしていく必要があると思われる。

引用文献

- 1) アレン, M.F., (1995) 菌根の生態学, 共立出版株式会社, 217pp.
- 2) Dixon, R. K., Rao, M. V., & Garg, V. K., (1993) Salt stress affects in vitro growth and in situ symbioses of ectomycorrhizal fungi, *Mycorrhiza*, 3: 63-68.
- 3) Heyser, R. L., Gao, J., Ducic, T., Tachd, Ph., Lu, C. F., Fritz, E., Gafur, A., & Polle, A., (2007) Paxillus involutus mycorrhiza attenuate NaCl-stress responses in the salt-Sensitive hybrid poplar *Populus × canescens*, *Mycorrhiza*, 17:121~131.
- 4) 徐化成 (1993) 油松, 中国林業出版社, 209pp.
- 5) Khasa, P. D., Hambling, B., Kernaghan, G., Fung, M., Ngimbi, E., (2002) Genetic variability in salt tolerance of selected boreal woody seedlings, *Forest Ecology and Management*, 165: 257-269.
- 6) 久米崇・長野宇規・渡辺紹裕・三野徹 (2004) 除塩灌漑に伴う排水不良農地の土壌塩分分布変動, 土木学会論文集, 233: 21-28.
- 7) 満多清・劉世増・严子柱・高志海・孙学刚 (2006) 樟子松苗木の耐塩性及其对造林林木生长的影响, *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 22 (2): 136-140.
- 8) Muhsin, T. M., & Zwiazek, J. J., (2002) Colonization with *Hebeloma crustuliniforme* increases water conductance and limits shoot sodium uptake in white spruce (*Picea glauca*) seedlings, *Plant and soil*, 238: 217-225.
- 9) 黄 艺・姜学艳・梁振春・季海波 (2004) 外生菌根真菌接种和施磷对油松苗抗盐性的影响, *Ecology and environment*, 13 (4): 622-625.
- 10) 中国樹木志編集委員会 (1983) 中国樹木志第1巻, 中国林業出版社, 973pp.
- 11) UNEP (2002) Synthesis : past, present and future perspectives, *Global environment outlook 3*, Earthscan, 20pp.
- 12) 吉川賢ら (2004) 乾燥地の自然と緑化—砂漠化地域の生態系修復に向けて, 共立出版株式会社, 235pp.

(2009. 7. 10. 受理)