中国トルファンの乾燥地における複数列の 混交防風林による農地の微気象改良

真木太一*・潘 伯榮**・鮫島良次***・杜 明遠***・川方俊和*

(* 農業研究センター耕地利用部
** 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所吐魯番沙漠研究站
*** 国際農林水産業研究センター環境資源部)

Microclimatic Improvement of Agricultural Fields by Multiple Row Windbreaks Made of Mixed Tree Species in the Arid Turpan Region of China

Taichi MAKI*, Borong PAN**, Ryoji SAMESHIMA***, Mingyuan Du***
and Toshikazu KAWAKATA*

(*Department of Farmland Utilization, National Agriculture Research Center,
3-1-1, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan
**Turpan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Biology, Pedology and
Desert Research, Chinese Academy of Sciences, 40, Beijing South Road,
Urumqi, China
***Environmental Resources Division, Japan International Research Center for
Agricultural Sciences, 1-2, Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan)

Abstract

Investigations of microclimatic improvement, sand protection, and growth promotion of a crop by multiple row windbreaks made of several mixed trees were carried out near the Turpan Desert Research Station at Turpan, Xinjiang, China in the middle of June, 1994. The main results are:

(1) Wind speed was decreased by the first windbreak partially recovered near the second windbreak, but decreased further after it, i.e., the decrease in wind speed was accumulative as the number of windbreak rows increased.

(2) In summer, excessive increases in air soil temperatures near the windbreak during the daytime had a negative effect on crops. However, there was a positive effect on the temperatures between the first and second windbreaks due to the decrease in radiative cooling.

(3) The water vapor content in the air was increased by evaporation from the soil and transpiration from windbreaks and crops, in particular in the weak wind at night because of the temperature decrease. Absolute humidity increased at the daytime in summer, but relative humidity generally decreased due to the temperature increase caused by windbreaks.

(4) Windbreaks promoted the growth and development of young crops, presumably due to the higher temperature and to the decreasing energy exchange accompanying the lower wind speeds. As a result, crop quality and productivity increased.

(5) Windbreaks made of *Ulmus*, *Elaeagnus* and *Populus* were suitable for an agricultural field in the arid Turpan region and windbreaks made of mixed trees and multiple rows were most suitable for making oases.

Key words: Arid land, Growth promotion, Microclimatic improvement, Mixed-multiple windbreaks, Sand protection.

キーワード: 乾燥地, 気象改良, 生育促進, 飛砂防止, 複合・複数列防風林

1. はじめに

地球上の全陸地の1/3は乾燥・半乾燥地であり、緑化(オアシス化)が進む一方では、人口増加による過開発、過放牧、過伐採による人為的な砂漠化が進んでいる。砂漠を緑化するためには、防風林が不可欠であり、オアシスには必ずと言ってよいほど防風林がある。

中国の乾燥・半乾燥地は中国総面積の52.5%を占め、特に砂漠面積は130.8万km²で、総面積の13.6%に達する(夏, 1988)。中国の乾燥地域における防風林に関する研究論文は新疆農科院(1976)、新疆生土研(1978)、治沙編委(1984)、Zhu *et al.* (1986)、Zhao (1990)、Song and Wei (1990)、Tulufan Work Station of Forestry in Xinjiang (1990)、Xiao (1990)、張ら(1990)、黄ら(1993)、潘ら(1993)、真木ら(1992, 1993, 1994a)などがある。しかし、防風林による減風の報告は多いが、気温、地温、湿度などの詳しい観測結果は著者らのものを除いて少なく、特に砂漠からオアシスへの微気象変化の詳細な報告は見当たらない。

ここでは砂漠化防止と緑化を最終目的として、農業限界地域、すなわち中国新疆吐魯番(トルファン)の砂漠とオアシスの境界地域において、防風林による気象改良・気候緩和効果と農業を行う上で重要な作物生育促進効果を評価するため、気象観測と作物生育調査(ワタの草丈)を実施した。乾燥地トルファンでは最高気温の出現は夏至を挟んだ6月中旬～7月中旬に多い。その最高気温発生時期である6月中旬に調査を実施した。

中国北西部の乾燥地域における防風林は、水が少しあればポプラが、少なければ胡楊、白榆、沙枣が、非常に少なければ紅柳(タマリスク)、沙拐棗が多く利用されている。タマリスクは耐風、耐干、耐寒、耐暑、耐砂、耐

塩性が最も大きい樹種の一つである(真木ら, 1992)。ここでは砂漠の最前線用の防風林樹種ではなく、砂漠と農地の境界線用の防風林樹種である白榆、沙枣、胡楊の3種で構成された混交防風林を利用して実施した。

なお、農林水産省国際農林水産業研究センターは中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所(烏魯木齊)と1993年4月～1998年3月に「環境保全」について第2期の日中共同研究を実施中であり、本研究は「乾燥農業限界地域の環境改善による持続的農業技術の確立」の課題の一環として実施した。

2. 観測方法

2.1 白榆・沙枣・胡楊防風林

大型防風林による気象観測日時は1994年6月15日15, 18, 21時, 6月16日6, 12, 15時である。観測場所は新疆生物土壤沙漠研究所吐魯番沙漠研究站付近の防風林・農地であり、観測位置は防風林からの高倍距離(防風林の高さ H の倍数で表した距離、－は風上、＋は風下)で示した。観測対象防風林はFig.1に示すように、北、南方向より時計回りに10°振って配置されている。

観測項目は風速、地表面温度(以下、地表温と呼ぶ)、気温、湿度であり、調査項目はワタの草丈である。風速計にはアネモマスター(日本科学工業社, 6061)、気温・湿度計にはデジタル温湿度計(チノー, HN-K)、赤外線放射温度計(地表温)にはスポットサーモメータ(ミノルタ, TR-0510)を使用した。地上1.5mの風速、1.0mの気温・湿度および地上30cmより非接触で地表温を測定した。また定常気象観測装置(真木ら, 1994b)では10気象要素を連続的に観測している。

強風時の主風向に対して、風上側(Fig.3Dでは風下側)の防風林(左側)から順に、第1～4列目の長さ450m

Fig. 1. Map of windbreaks and observation lines around marginal land of desert and oasis.

の防風林帯列を第1～4林と呼ぶ (Fig.1)。この大型混交 (複合) 防風林における第1林は白榆 (*Ulmus pumila* L.)・沙棗 (*Elaeagnus angustifolia* L.) 樹であり、その高さは8 m、密閉度は70% (上層60, 中層80, 下層70%で上～下層部の密閉度はほぼ均一) である。第2林は白榆・沙棗・胡楊 (*Populus euphratica* Oliv.) 樹で構成されており、その高さは8 m、密閉度は70% (上層60, 中層70, 下層80%で中層が第1林の上・下層よりも疎) であり、下層には高さ1 mの枸杞 (*Lycium barbarum* L.) の防風垣が第2林の風下末端にある。第3林と第4林は同じく白榆・沙棗・胡楊樹であり、それらの高さは8 m、密閉度は70% (上層60, 中層70, 下層80%) である。

2.2 ポプラ防風林

小型防風林 (垣) による気象観測日時は1994年6月15日17時半, 6月16日14時半, 18時半である。観測場所・位置・項目は前節の防風林観測と同様である (Fig. 1)。

防風林はポプラ (銀白楊または新疆楊, *Populus alba* L.) 樹である。その防風林 (第1林) の高さは4.5 m、幅 (枝張り) 1 m、長さ57 mであり、密閉度は上・中・下層で40, 50, 60%の平均50%である。この第1林の風下には第2林があるが、これは前節の第1林の一部に相当する。しかし、ポプラ防風林の長さは短く、しかも強風の主風向時には大型防風林帯列への影響は小さい。

3. 観測結果

3.1 定常気象観測装置による気象経過

1994年6月15日6時～17日18時の高さ1.0 mの気温と相対湿度、深さ0.5 cm, 10.0 cmの地温の変化を Fig. 2Aに、高さ6.0 m, 1.0 mの風速と日射量の変化を Fig. 2Bに示す。

気温は日中に40℃を越えているが、気温の日較差は雲が多いため、乾燥地域としては大きくない。

17日に地表面付近の地温 (以下、地面温と呼ぶ) は63.1℃の最高を、最低は気温に近い22.7℃であった。この地面温は0.5 cm深の地温で、正確な意味での地表面温度でないため、温度の日較差は小さく、時間の遅れがある。地面温は昼間には気温より10℃程度高く、夜間は気温の逆転が発生するため概して低い。

相対湿度は昼間に低く、夜間に高いが、湿度の変化幅は昼間よりも夜間に大きい。15日夜半～16日早朝は40～55%, 16日の夜間には40%以下を示し、17日4時半には62.0%の最高を、日中には24.0%の最低を示した。

風速は15日15～23時に5 m/s以上で大きく、16日11時～17日1時でも大きい。最大風速は1時間平均で16日13時の12.8 m/s、12時30分に10分間平均で14.4

Fig. 2. Variations of (A) air temperature (T_a , °C) and relative humidity (RH, %) at the height of 1.0 m, and soil temperature (T_s , °C) at the depths of 0.5 and 10.0 cm, and of (B) wind speeds (U_6 , U_1 , m/s) at the heights of 6.0 m and 1.0 m and solar radiation (S_r , MJ/m²) at Turpan, China from June 15 to 17, 1994.

m/s, 最大瞬間風速では19.3 m/sであった。一般に午後から夜半は強風で、夜半から午前中は弱風である。16日では強風の発生時間は早く、かつ強い。なお17日18時～18日3時に強かった。

地上1 mの風速が5 m/s (6 mで7 m/s)以上から砂塵、風食 (真木ら, 1993) が発生するが、それらの強風は15日午後5時間, 16日には13時間あった。

最多風向は15～16日にSW, 17日にNNEであった。時間平均風速5 m/s以上の強風時の最多風向はSSW～WSWであり、4 m/s以下の弱風時にはNNE～NWであった。なお防風林の観測は西寄り, 東寄りの両風向時に実施した。

3.2 白榆・沙棗・胡楊防風林

(1) 2列の防風林による微気象変化

最高気温出現時 (15日15時, Fig. 3A): 基準風速 (−10 Hの高さ1.5 m) は7.5 m/sの強風である。この風速を基準にした相対風速 (U_r , %) は第1 (1列目) 防風林内で急減して15%になり、減風範囲は広い。22～23 Hで80%まで回復し、再び第2林で減少する。地表温 (T_s , °C) は主として日射の影響で第1・2林直前で昇温するが、

Fig. 3. Horizontal variations of five meteorological elements caused by two row windbreaks made of main three mixed trees at the arid land, Turpan, China.

(A) 15:00 June 15 and (B) 18:00 June 15, (C) 21:00 June 15 and (D) 6:00 June 16, 1994
WD: wind direction, U_r : relative wind speed (%), T_s : surface soil temperature ($^{\circ}\text{C}$), RH: relative humidity (%), T_a : air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and AH: absolute humidity (g/m^3).

林内では日陰のため低く、第1林直前・直後での温度差は 25°C に達する。防風林通過後は日射による昇温と乱流輸送の減少で昇温する。相対湿度(RH, %)は一般に気温(T_a , $^{\circ}\text{C}$)と逆の変化を示し、 $3\sim 10H$ では昇温による乾燥化の影響が大きい。 T_a は林内と林直後での低下が小さいが、防風林の風下での昇温が大きく防風林の風上より高温となるので、作物にとってマイナスの効果となる。絶対湿度(AH, g/m^3)の変化は全体的にはRHと類似する。また、第1林、第2林の風下側はAHが増加しており、加湿効果が認められる。このように、植物からの蒸散による加湿は乾燥地の重要な気象改良効果である。

夕方(15日18時, Fig.3B): U_r は第1林直前で少し大きいですが、第1林通過後は小さく、第2林の直前で約60%に回復後、再び減少する。 T_s は変化が小さいが、第1・2林の直前は弱風化と主に日射によって $1, 2^{\circ}\text{C}$ 高

い。RH, AHは防風林の風上側で少し低く、第1・2林通過後は高い。 T_a は防風林の直前で高く、直後で低い。

夜間(15日21時, Fig.3C): U_r は第1林で34%に減少し、第2林の風上で約80%に回復し、第2林で減少する。防風林の風上側と林内の T_s は夕日による昇温状態が保持されて約 3°C 高い。第1林と作物の蒸散でRHは1%余り加湿される。AHは気温降下で反映して上昇程度が小さい。なお、第2林の風下側の破線($\times$ 印)は、小雨が降り始めた直後の気象であり、 T_s , T_a は低下、RHは上昇する。

日出時(16日6時, Fig.3D): 弱風で、しかも逆風時の減風は林内で大きく、 U_r は第2林(風上林)で約40%に減少し、林間圃場内(第1林)の $-10\sim -15H$ でかなり回復する。 $-5\sim -2H$ では風が上方に逃げ、林内の下層には進入し難くなり、第1林(左側)の風上(右)側に空

気が停滞する。 T_s は早朝のため変化は小さい。 RH は第2林の通過後よく加湿されて約8%高い。第1林の風下側は裸地のため RH の低下が顕著で、46%に乾燥する。 RH , AH の変化はよく似ており、 T_a はあまり変化しない。

(2) 4列の防風林による微気象変化

南中時(16日12時, Fig.4A) : U_r は第1林で39%に減少し、第2林の風下では第1林より小さい33%であった。回復程度も第1林で82%, 第2林で63%で、減風効果の加算が認められる。 T_s は日射によって第1林風上直下で昇温し、林内から林の風下直下では日陰のため降温する。2Hでは昇温が大きい、圃場内では作物による日陰と加湿のためやや低い。第2林の0Hと5Hでは20℃の温度差がある。

RH は第1林で2%, 第2林で1%加湿し、第3林の前方で最も高くなる。これは防風林と作物からの蒸散で湿度の加算されたためである。 T_a は風が強く変化は小さいが、第1林で加湿による潜熱消費のため少し低下する。第2林の後方でも加湿するが、 T_s の上昇が非常に大きいいため、 T_a は第1林と比較して約1℃高い。第3林の前方では加湿により降温し、複数列林による効果が出ている。第3・4林付近では AH と RH の変化はほぼ同じであるが、気温低下が影響しているので上昇程度がやや小さい。

最高気温出現時(16日15時, Fig.4B) : 第1林による U_r の減少は12時の場合よりやや小さいが、防風林による広範囲な減風とその減風効果の加算がある。 T_s は第1・2林の風上直下では日射(薄雲による弱光)のため少し高く、林内で低下する。第1林の風下では高いが、第2林通過後は低い。これはワタの草体(第2林の風下の方が繁茂)と土壌面の凹凸に斜光が射すための日陰と5~10Hの RH の上昇とが関与する。 RH は第1林と圃場からの蒸発散によって1%強、さらに第2林で1%加湿し、気象改良が認められる。 T_a の変化は小さいが、これは地表温の上昇程度が12時や15日15時と比べて小さいためと考えられる。なお、 AH は一般に上昇するが、第2林の15~25Hでは上昇程度が小さい。また12時の場合にも15~20Hで同様の減少があり、これはワタの作付不良(欠株)が関与していると考えられる。

以上のように、4列の防風林の効果として、全般的には減風・加湿が大きく、加算効果が認められる。

(3) 2列の防風林によるワタの草丈変化

2列の白榆・沙枣防風林によるワタの草丈変化(Fig.

Fig. 4. Horizontal variations of five meteorological elements caused by four row windbreaks made of main three mixed trees at Turpan.

(A) 12:00 June 16 and (B) 15:00 June 16, 1994

U_r : relative wind speed (%), T_s : surface soil temperature (°C), RH : relative humidity (%), T_a : air temperature (°C) and AH : absolute humidity (g/m^3).

5A)をみると1~10Hで高く、12~17Hでやや低い。また、19~24H(-1~-5H)で高く、第2林の効果がよく出ている。ただし厳しい乾燥気候では、防風林による減風効果の及ぶ範囲はあまり広くなく、10H程度までである。しかし、作物の生育促進、または乾燥地での作物栽培にとって、この防風林は有効である。付近にはコウリヤン、ネギ、ニンニク、ブドウなどがあり、コウリヤンの草丈では同様な傾向が認められた。

3.3 ポプラ防風林

(1) ポプラ防風林による微気象変化

夕方(15日17時半, Fig.6A) : U_r は2~3Hで30%に減少し、次第に回復する。 T_s は夕方のため高くないが、防風林通過後、36℃から34℃に低下し、10Hでは回復する。 RH の1~2%の上昇は防風林による気象

Fig. 5. Variations of plant heights of cotton caused by the windbreaks made of (A) three mixed trees and (B) poplar at Turpan on June 15, 1994.

改良である。 T_a は T_s と比較的類似しており、 RH の増加とは逆に5Hで1℃余り低下する。各気象要素は第2防風林(3.2節の第1林)の影響で15~20Hで回復が早い。

最高気温出現時(16日14時半, Fig.6B): U_r は風下側で28%に減少し、急激に回復に向かうが、10Hの約80%から再び第2林(実線)で減少する。第2林は白榆・沙枣で、幅も15mと広く、影響が大きい。 T_s は防風林直前で昇温するが、通過後は主として日陰のため41℃まで降温し、2Hで59℃のピークを取る。 RH は5Hで約3%上昇し、第2林でさらに上昇する。これが乾燥地での防風林による気象改良である。 T_a は1~3Hで約2℃高く、夏季、日中の気温上昇は不利である。

Fig.6Bの破線(×印)は第2林(前節の第1林)に切れ目(隙間)がある場合で、相対的に強風である。 T_s では切れ目の方が低い。これは強風によって T_s が T_a に近づくためである。切れ目では基準風の特性に近づき、 RH は低く、 T_a は逆にやや高くなる。

日没時(16日18時半, Fig.6C): U_r は防風林通過直後25~30%で、減風が大きく、20Hで約90%まで回復する。16日17時半より遅い(日没時)ため、 T_s 、 T_a 、 RH 、 AH の変化は小さい。 T_s 、 T_a は防風林前後で高く、 RH は少し低いが、通過後2~3Hでは逆である。

(2) ポプラ防風林によるワタの草丈変化

ポプラによるワタの草丈(Fig.5B)は2~5Hで18cmと高く、効果が認められる。6H以降では次第に減少し、15~20Hでは11cmである。対照区(10cm)との比較では最高8cmの差となり、前述の大型防風林内圃場の例よりも初期の生育ステージではあるが、効果は比較的認められる。

Fig. 6. Horizontal variations of four meteorological elements caused by the poplar windbreak at Turpan.

(A) 17:30 June 15, (B) 14:30 June 16 and (C) 18:30 June 16, 1994

WD: wind direction, U_r : relative wind speed (%), T_s : surface soil temperature (°C), RH : relative humidity (%) and T_a : air temperature (°C).

4. 考 察

4.1 気象の経過についての考察

6月15~17日の最高気温・地温は、この期間としては特に変わらないが、最低気温については曇雨天がやや多かったため比較的高い。湿度は夜間に比較的高く、17日早朝には気温の急激な低下に伴って高かった。

6月中旬の風速変化は、午後~夜半に強く、夜半から午前中に弱い、類似した日変化を示す。強風の吹走時間は、例えば15日は平均的な時間帯に、また16日はかなり早くからやや遅くまで、17日にはやや遅くから吹く

が、ほとんど毎日、10 分間平均風速 10 m/s 以上の風が吹いている。

15 日 14 時に 6 m 高の風速が 4.6 m/s でやや強く、直後の 14 時半には相対湿度が 24.9 % まで急減している。16 時には 1 時間平均風速で 10.2 m/s (最大瞬間風速 14.5 m/s) の強風である。強風は 23 時まで続くが、相対湿度は 23 時半まで 40 % 強までである。その後、風が弱まると相対湿度が増加して 16 日 9 時付近まで高い。ただ 8 時には風速 5.7 m/s でやや強く、湿度はやや低い。また 16 日の強風時にも湿度が低く、17 日早朝の弱風によって湿度が急上昇している。

これらの関係を求めると、16 日 1~24 時 (Fig. 7A) と 15 日 16 時~17 日 6 時における高さ 1.0 m の 1 時間平均風速 (U , m/s) に対する 1 時間平均相対湿度 (RH , %) には、それぞれ次の関係式 (相関係数 r は 0.850, 0.828) がある。

$$RH = -1.57U + 48.0 \quad (1)$$

$$RH = -1.83U + 48.8 \quad (2)$$

なお、時間平均風速と毎正時の中央 (30 分) の相対湿度間の r はそれぞれ 0.900, 0.789 であり、また指数関数式で表しても、 r は 0.851, 0.835 で、ほぼ同様である。

また、 U に対する高さ 1.0 m の 1 時間平均気温 (T , °C)

には、それぞれ次の関係式 (r は 0.823, 0.863) がある。

$$T = 1.21U + 27.8 \quad (3)$$

$$T = 1.49U + 26.3 \quad (4)$$

さらに、16 日 1~24 時 (Fig. 7B) と 15 日 16 時~17 日 6 時の T と RH には次の関係式 (r は 0.895, 0.892) がある。

$$RH = -1.13T + 78.3 \quad (5)$$

$$RH = -1.14T + 78.2 \quad (6)$$

各相関係数から判断して、より適合する関係式は時間帯によって異なるが、式 (1), (4), (5) である。

以上のことは、風速が増大し気温が上昇すれば、湿度が低下することを意味している。従って、この強風は真木ら (1994b) で述べたと同様、天山越えのフェーン風で乾燥した高温の風 (以下、乾熱風) であると判断できる。また乾熱風が吹く昼間の時間帯には日射量も日照時間も相対的に多い。なお 17 日の昼間には弱風で乾燥し、気温も高く、15~16 日とは少し気象条件が異なるが、夜間にはまた乾熱風が吹いている。

4.2 防風林による減風

防風林の列数増加による加算的效果事例として、Zhao (1990) はゴビ沙漠で 5 列の防風林帯による減風率が 70.3 % であって、1 列の場合より 27.2 % 増加した報告をしている。

防風林による風速の減少は密閉度によって変わるが、これらの防風林の場合は 70 % 程度であり、密閉度だけからみると、比較的理想的な防風林と考えられる。ただし、防風林の樹木の下層部では、枝払いと家畜の食害で枝葉が少ないため、下層部に風が収斂して、相対的に強風となる。なお、防風林内の樹幹直後では弱く (Fig. 3A), 逆に林内の樹間 (Fig. 3B, C) では相対的に強い。

乾燥した強風の被害を受けて、主風向の風上側の枝があまり伸張しないが、風下側には伸張しやすいため、風下側の農地上に進入する。例えば大型混交防風林の場合では風上側に枝が 2 m 伸張するが、風下側には 8 m も伸張するなどである。このため作物を栽培している耕地側の風速は減少し、特に Fig. 3D の例のように、風向が逆向きで、弱風である場合にはその傾向が強く、風は防風林の風上側に停滞するか、防風林の上方へ逃げて、防風林下層を通過する風は少なくなる。従って、防風林の風上側では気流が停滞するため、気温や地温の過剰昇温が考えられるが、逆風向時には夜間であったり、その時の天候は曇雨天のことが多く、これによる作物への影響は小さい。

防風林の間隔が 100 m の場合は、樹高 8 m で高倍距離が 12.5H となる。乾燥地では気候が厳しいため、主風向に対して風上側の第 1・2 列目の間隔を 12H 程度以下に

Fig. 7. (A) Relations between wind speed (U , m/s) and relative humidity (RH , %), and between wind speed (U , m/s) and air temperature (T , °C). (B) Relation between air temperature (T , °C) and relative humidity (RH , %).

することが望ましい。もちろん2・3列目以降であれば、1列目の影響が2列目以降に作用し、また樹木自体も保護されて生長が速く、効果的であるため、間隔は15～20Hでもよい。

Fig.3Cの第2林の風下側では、実線から破線へと地表温・気温の低下、相対・絶対湿度の上昇が顕著である。これは乾熱風に加えて小雨があったためであり、雨粒からの蒸発による蒸発潜熱の消費によって、乾燥した高温の風が相対的に湿った低温の風に変質したものである。また、この時、地表面の濡れによる急激な蒸発潜熱の消費で地表温も低下する。

4.3 気温・地表温の上昇・下降

中国の乾燥地での気温・地温への影響事例を示すと、①乾燥条件下の防風林下層部(1.5m高)の気温が夜間に0.7～3.4℃低下(治沙編会, 1984)、②夏季は気温は2.4～3.6℃低下、地温は昼間に0.3～0.5℃、夜間に1.1～2.5℃上昇(Xiao, 1990)、③5種類の防風林による最高気温は防風林の影響のない値より1.4℃増加、最低・平均気温はそれぞれ、3.3、0.3℃減少、最高・平均地表温は1.6、1.1℃上昇、最低では3.5℃低下、5cm深の地温上昇、10～20cm深の地温低下(Tulufan Work Station of Forestry in Xinjiang, 1990)、④夏季の気温は0.1～0.4℃低下(Zhao, 1990)、⑤ポプラ・白榆・沙枣防風林による気温・地温の低下(潘ら, 1993)などである。

以上のように、防風林の前後における気象改良事例はいくつかあり、季節、昼夜間、密閉度、高さ、風向など種々の条件が異なる。このためトルファンでの観測結果と定量的比較は難しいが、定性的にはほぼ一致しており、著者らの結果も含めて総合的には防風林は有効である。

次に、各観測結果を①～⑤の報告と比較して整理すると、気温・地表温は防風林の前後で、日中は昇温、夜間は降温が多いが、夏季の日中の昇温は作物にはマイナスの効果となり、夜間の降温は有効である。逆に秋～春季には林間での夜間の降温は好ましくない。夏季には防風林と圃場からの蒸発散による潜熱の消費で、降温するが、加湿が小さい場合には昇温する。これは湿度、すなわち樹木、農作物からの蒸散と地表からの蒸発の多少に関連するため、乾燥地であるので水量には限界があるが、灌漑量が多いと有効である。ただ、防風林前後では風速自体が減少するので、作物に対してはその影響がやや小さいと考えられる。地表温は風速が減少すると日射による昇温が大きいため、夏季にはマイナスの効果となる。

4.4 湿度の上昇・下降と蒸発散量の減少

Brandle *et al.* (1988)は防風林の蒸散による加湿を報告しており、中国でも①治沙編会(1984)の9.5%の相対湿度増加、②新疆農科院(1976)の20%の蒸発散量減

少、③Tulufan Work Station of Forestry in Xinjiang (1990)の9.5%の湿度増加と日蒸発量9.9mmで半減、④Zhao (1990)の31.6%の蒸発量減少、2.0～9.7%の湿度増加、⑤黄ら(1993)の灌木林での湿度上昇と蒸発量減少、⑥張ら(1990)の土壤水分増加と蒸発量減少、⑦Song and Wei (1990)の土壤水分増加、⑧Xiao(1990)の1～4%の土壤水分増加の事例がある。

各観測結果を上述の文献と比較して次のようにまとめた。防風林による加湿効果は乾燥地域では非常に重要な気象改良・緩和効果であり、防風林に対して風向が直角で、しかもあまり強風でない場合に大きい。また、1列目の風上防風林で樹木葉からの蒸散および林帯内部の地表面からの蒸発が作用して空気中の湿度が増加するが、1列目よりも2列目の方が湿度は高くなる。なお、湿度の加算効果ではZhao (1990)の報告がある。ただし、乾燥地域の夏季の高温時には防風林の蒸散による加湿よりも、圃場内のワタ作物の蒸散と、特に灌漑した場合では地表面からの蒸発による加湿の方が大きい、これもオアシスの気象改良効果と評価できる。

一方、防風林による相対湿度の下降、乾燥化が、特に日中、例えばFig.3Aの2～5Hのように、防風林の後方で発生する。これは主として気温の上昇に起因し、気象緩和からはマイナスであるが、絶対湿度(Fig.3A)をみると加湿しており、効果は確実にある。

さらに乾燥地の植生にとっては、湿度がかなり高い場合には植物の枝葉への水蒸気の吸着が考えられる。これは興味深い現象、すなわち植生が生存のため若干でも水分を吸収しておこうとする生理現象であり、防風林も作物にも、乾燥地での加湿は有効である。

4.5 堆砂への影響

耕地防風林内では、あまり飛砂が多くては作物栽培ができなくなるので、風食・堆砂はそもそも少ないが、それでも砂漠、荒地の風上側に接するところでは少し風食があった。本観測では防風林の下層の枝葉が少ないため、堆砂は少ないが、一部、下層部が密なところでは堆砂現象が認められた。

なお、防風林・ネットによる堆砂はすでに真木ら(1992; 1994a)の報告があり、距離別の変化状況を示した。

4.6 作物への効果

防風林による気象改良効果によって、作物の生育は促進し、また作物の収量は増加し、さらには品質が向上する。これらは生育初期の低温時における気温の上昇と強制蒸散の低減による作物体内養分のエネルギー消費量の減少に起因する生育促進であり、最終的には減風、生育初期の加温、加湿、蒸発散減などによる収量増と品質向

上である。なおこれらは中国乾燥地での微気象改良と作物への効果事例と一致するもので、作物収量増(新疆農科院, 1976)、河北省の圃場内での穀物収量の増加、千粒重の増加(Song and Wei, 1990)、トウモロコシ、ダイズ、コウリヤン、アワの増収(張ら, 1990)、またゴビ沙漠で5列の防風林帯による発芽率が33.6%増加、発芽は2日、開化は4日促進、収量は1Hで17.7%減、3~10Hで50.3%増、全体では20.7%増(Zhao, 1990)などがある。

ここでは、生育初期の生育促進データだけを示したが、ワタ、トウモロコシ、コウリヤンの最終的な草丈の増加量とワタの収量増加は、すでに1992~1993年に同地区で調査し、草丈増加と増収(真木ら, 1994a)を報告した。

4.7 複数列防風林と混交防風林の意義

複数列の防風林の効果は前述したように、風上から1列目、2列目へと列数の増加につれて、影響・効果が加算される。特に砂漠(裸地)からオアシス(農地)の遷移領域では、1列目の気象改良が大きく、それが2列目で加算的に作用し、さらに列数が増えるにつれて、次第に一定な気象環境になる。ここでの防風林帯の列数は多くあるが、4列目の風下ではワタは栽培されてなく、整地した裸地のため、観測は行わなかった。一般的には碁盤の目状の防風林帯網の内部では安定したオアシス環境となる。

従って、1列目の防風林は林帯幅を広く、樹高を高く、密にする必要があるが、砂漠では短期間にこのような防風林を造成することは難しく、費用・労力・面積も多くかかるため、理想的に行かない場合も多い。現実には1列目防風林の風下では作物生育が悪く、収量も低いことが多い。このため耐風・耐乾作物の導入や2列目以降の効果を期待して、1列目の風下での高成績はあまり期待しない場合もある。2列目以降では作物種の選択も増え、品質も向上して多収となる。

観測に用いたポプラ防風林は1列であり、若齢で、背が低い、白榆・沙棗・胡楊の混交防風林帯は多列(3~6列)で背が高いため、気象改良への影響程度は混交防風林の方が高い。ポプラは促成的に高木化し、林木の利用価値が高いが、乾燥地では灌漑が不可欠であり、水条件に制約されるため、乾燥地では導入に限度がある。多列にする場合には広範囲な防風効果を期待できる。

混交防風林は一般的には、上・中・下層の多層で樹種と繁茂度(密閉度)を自由に換えられる特徴がある。胡楊は高木化するが、日陰を嫌うため枝が偏在化し、幹を切断すると柳状の葉が出る特徴がある。白榆は細枝が多く、風になびきやすく、防風効果がやや低い。沙棗は下層から灌木状に密生して生え高木化しないが、初期生育は早く、高密化する。しかも刺があるため、家畜の食害を

あまり受けなく、また、たとえ受けても回復が早い。このことは乾燥地に共通する羊・山羊の放牧において、非常に重要な意味を持つ。

防風林内に1列(単列)の樹木がある場合と防風林内に数列の樹木がある場合の差異は、一般に減風は数列の場合が高いが、造成費用・労力の問題、農地ではつぶれ地の問題、枝打ち、灌漑など維持・管理の問題などがあり、目的にかなった配置が必要となる。林帯内に複数の樹木があると、樹木の相互作用によって微気象が改良され、初期生育がよく、生長しやすい特徴もある。

単一種では病虫害が付くと全体が被害を受け、防風効果が激減することがあるが、多種であれば、被害を免れることが多い。事実、数km離れた単一の白榆防風林が害虫の被害を受け、夏季であるのに冬枯れ状態を呈したが、混交林では益鳥・虫などが棲み、餌としての樹木の出芽・着果や害虫発生の時期・程度、枝・根の分布状況などの多様化によって生態的に機能して被害は軽減される。

従って、防風林内の枝葉はかなり複合するが、主に下層は沙棗、中層は白榆、上層は胡楊の混交林が成り立つ。混交林は互いに補完し合い強化されることが、乾燥地での長年の経験から判り、応用されている。

5. ま と め

1994年6月中旬に乾燥地トルファンの新疆生物土壤沙漠研究所吐魯番沙漠研究站で複数の防風林による気象改良・防砂・作物生育促進の各効果について調査を行った。

(1) 第1防風林付近の風速は減少し、林間では少し回復し、再び第2防風林で減少する。第2, 3, 4列と防風林の増加につれて減風効果が加算され、またその他の気象緩和も間隔が10~20Hの場合には加算されることが多い。

(2) 夏季、昼間には防風林付近の気温・地温は過剰に上昇し、作物にとってはマイナスの効果となるが、夜間には両防風林間で裸地面が多く、放射冷却が大きいために、減風に伴う降温の程度が大きい。

(3) 防風林と耕地内作物からの蒸散および地面からの蒸発によって加湿され、相対・絶対湿度は上昇する。特に夜間には気温が低下するため、湿度上昇が顕著である。夏季の昼間にも絶対湿度は増加するが、相対湿度は防風林による昇温作用によって減少・乾燥化すること多い。

(4) 砂漠とオアシスの境界付近では防風林による防砂・堆砂作用が大きい。密閉度が高いと防風林内に溜まり、低いと防風林を透過することが多い。

(5) 防風林の減風による昇温および強制蒸散減による

作物体内エネルギーの消耗減によって、作物の初期生育は促進され、最終的には高品質・多収へと有効に作用する。

(6) 白榆・沙枣・胡楊の大型混交防風林は気象改良・緩和が高く、複数配列すれば乾燥地の耕地防風林に適する。

引用文献

- Brandle, J. R., Hintz, D. L. and Sturrock, J. W., 1988: *Windbreak Technology*, Elsevier, Amsterdam, 598p.
- 治沙造林学編会, 1984: 治沙造林学, 林業出版社, 323 p.
- 黄 丕振・潘 伯榮・周 智斌・真木太一, 1993: 吐魯番沙地人工灌草植被对小气候的改良效果. 日中共同研究成果発表報告会論文集, 熱帯農研, 35-41.
- 真木太一・潘 伯榮・黄 丕振・閻 国榮, 1992: 中国トルファンの乾燥地におけるタマリスク防風林による微気象改良. 農業気象, **48**(2), 157-164.
- 真木太一・潘 伯榮・杜 明遠・上村賢治, 1993: 中国トルファンの乾燥地における防風ネットによる微気象改良と飛砂防止. 農業気象, **49**(3), 159-167.
- 真木太一・潘 伯榮・杜 明遠・上村賢治, 1994a: 中国トルファンの乾燥地における2列の防風林による微気象, 堆沙, 作物への影響. 農業気象, **49**(4), 247-255.
- 真木太一・潘 伯榮・杜 明遠・上村賢治, 1994b: 中国北西部の乾燥地トルファンにおける砂漠・オアシス気候と蒸発散特性. 農業気象, **50**(3・4), 185-195.
- 潘 伯榮・黄 丕振・劉 志俊・真木太一, 1993: 吐魯番防護林の気象効応. 日中共同研究成果発表報告会論文集, 熱帯農研, 23-30.
- Song, Z. and Wei, L., 1990: The relation between microclimatic factors in shelterbelt networks and crop yield. *Protective Plantation Technology*, Northeast Forestry Univ., 211-217.
- Tulufan Work Station of Forestry in Xinjiang, 1990: The ecological effect of sand-fixing shrubbery in Tulufan area, Xinjiang. *Protective Plantation Technology*, Noetheast Forestry Univ., 272-275.
- 夏 訓誠, 1988: 沙漠と人間, *Shimizu Bull.*, **57**, 2-3.
- Xiao, L., 1990: Shelterbelt benefits and planting technique in the mixed zone between farmland and pasture land in Houshan, Inner Mongolia. *Protective Plantation Technology*, Northeast Forestry Univ., 301-304.
- 新疆農業科学研究院, 1976: 吐魯番県林網系統防風效能的研究. 沙漠の治理, 科学出版社, 81-87.
- 新疆生物土壤沙漠研究所, 1978: 新疆沙漠和改造利用. 新疆人民出版社, 124 p.
- Zhao, H., 1990: Evaluation of effects of farmland shelterbelts in the Gobi Desert area. *Protective Plantation Technology*, Northeast Forestry Univ., 209-210.
- Zhu, Z., Liu, S., Wu, Z. and Di, X., 1986: *Deserts in China*, Inst. Desert Research, Lanzhou, 132p.