

黄土高原南部における水蒸気の鉛直輸送と大気水収支

—2005 年と 2006 年の比較—

高橋厚裕¹・檜山哲哉²・西川将典³・樋口篤志⁴・福嶋義宏¹

1：総合地球環境学研究所

2：名古屋大学・地球水循環研究センター

3：名古屋大学・大学院環境学研究科

4：千葉大学・環境リモートセンシング研究センター

1. はじめに

黄土高原は黄河流域の中流域に位置し、黄河流域に占めるその面積は広大である。このため、黄土高原における大気―陸面の相互作用とそれが降水に与える影響を明らかにすることは、黄河流域の水循環を考える上で重要である。

黄土高原南部では、台地と谷が複雑に分布しており、台地の頂上部が平坦である一方、傾斜が大きい谷が入り組んでいる独特の地形を有している。この地域は半乾燥域に属しているが、天水農業が行われており、台地上には小麦やリンゴ、トウモロコシ等の耕地がランダムに広く分布している。このような複雑な地形と不均一な地表被覆という条件下における水収支と大気水蒸気の鉛直輸送の日変化、季節変化、年々変化を明らかにするために、我々は 2004 年 6 月から大気境界層の長期連続観測を行っている。これまでの観測により、夏季の黄土高原南部では、大気境界層内に強い鉛直流が存在し (Nishikawa et al., 2005)、それに伴い積雲対流が発達すると、鉛直方向の水蒸気輸送が強まるために、大気下層と上層において大気水蒸気量に逆相関的な日変化を示すことがわかってきている (Takahashi et al., 2007)。

本研究では、2005 年と 2006 年における水収支の季節変化を調べ、夏季における降水量の日変化と大気水蒸気量の鉛直輸送について考察した。

2. 観測地と方法

観測場所は中国科学院・長武黄土高原農業生態試験所の小麦圃場 (35.24°N, 107.68°E, 標高 1224 m) である。周辺には小麦畑の他にリンゴ畑やトウモロコシ畑、また一部に民家などの建物が分布している。圃場内では冬小麦の栽培が行なわれており、毎年 9 月に種がまかれ、翌年の 6 月に収穫が行なわれる。圃場内には高さ 32 m の接地境界層観測タワーが設置され、2004 年 6 月から微気象観測を行うとともに、2005 年 5 月にマイクロ波放射計 (TP/WVP-3000, Radiometrics Co, USA) を設置し、高度 10 km までの鉛直 1 次元の水蒸気量、雲水量と気温の連続観測を行っている。32 m タワーには 32 m、12 m、2 m の 3 高度に超音波風速計 (R3, Gill Instruments Limited, UK) と open-path 型赤外線式 H₂O/CO₂ ガス変動計 (LI-7500, Li-Cor Co., USA) が設置されており、風速 3 成分と気温、水蒸気量、CO₂ 濃度を測定し、顕熱、潜熱、CO₂ の各フラックスを取得している。本研究では、高度 32 m で測定された乱流変動から渦相関法により、顕熱フラックスと潜熱フラックスを計算したが、一部の期間において高度 32 m 部の測器が故障したため、その期間は高度 32 m と 12 m で測定された気温と湿度からボーエン比法によって顕熱および潜熱フラックスを求め、渦相関法による計算結果を補間した。また、平均気温、湿度が高度 32 m と 12 m のいずれかにおいて欠測であった場合は、高度 2 m における値を使用して両フラックスを求めた。

2005 年 5 月 11 日～7 月 13 日と 2006 年 5 月 15 日～7 月 10 日の期間に、現地において集中観測を行い、現地時刻の 8 時から 18 時の間の正午を除く毎正時に、雲量と 10 種雲形による雲タイプの観測を行った。

3. 結果と考察

2005 年と 2006 年の各年について、降水量と蒸発散量の月ごとの総量の季節変化、および月平均の顕熱フラックスの季節変化を図 1 に示す。2005 年では、年降水量が 515mm、積算蒸発散量が 440mm であり、2006 年では、年降水量が 452mm、積算蒸発散量が 350mm であった。このように、降水量のおよそ 80 %に相当する水が蒸発散によって地表面から大気に戻り、土壌への浸透は、2005 年では 80mm (年降水量の 15 %)、2006 年では 100mm (年降水量の 22 %) であった。

図 2 は、図 1 で示した降水量と蒸発散量の季節変化に加えて、マイクロ波放射計により測定された大気水蒸気量 (地表面から高度 2 km までの総量と地表面から高度 10 km までの総量) の季節変化を併せて示している。2005 年と 2006 年のいずれの年においても、6 月から 7 月にかけて、大気水蒸気量が急激に増加している。2005 年の 7 月中旬から 2006 年 4 月上旬までは、マイクロ波放射計の電源部の故障により、大気水蒸気量は欠測となったため、図では 2005 年 8 月から 2006 年 3 月までが欠測期間となっている。2006 年においては、大気水蒸気量は 7 月に最大値となり、その後 12 月にかけて単調に減少した。7 月から 12 月にかけての蒸発散量の季節変化も同様に単調減少を示した。これに対し、降水量の季節変化は、8 月に最大値となり、9 月においても、7 月と同程度の降水量が観測された。7 月から 9 月の 3 ヶ月間に降水が多いことは、黄土高原に特徴的な夏雨気候を表している (大和田ら, 2005)。また、2004 年、2005 年、2007 年の 6 月から 9 月の期間における降水について、一日を 1 時間毎に区切り、各時間帯で発生した降水量を積算して表したのが図 3 である。2006 年については測器の不具合のために欠測である。2004 年と 2007 年のように、日中は少なく朝夕と夜 18 時から 22 時の時間帯に多いという日変化と、2005 年のように日中にも比較的多い日変化を示す年がある。このような年毎の変動はあるが、全ての年で、夜に大きなピークがみられた。これは日中に発達した対流活動の影響である可能性が考えられる。

日中に対流活動が強くなる例として、Nishikawa et al. (2005) が報告しているような大気境界層内の強い鉛直流と積雲対流の発達がある。長武では、大気水蒸気量が増加する 6 月下旬において、特に発達した背の高い積雲が頻繁に観測されている (Takahashi et al., 2007)。また、このような発達した積雲は特に日中の午後に頻繁に観測される。図 4 には積雲が特に発達していた期間において、マイクロ波放射計で測定された大気水蒸気量 (4 高度) とボーエン比法で求めた地表面における潜熱輸送量、およびウィンドプロファイラから求められた大気境界層高度の日々変化を示す。大気境界層高度については、層状雲や夜間の過大エコーが生じる時間は除外し、日中の変化のみを表示している。図 4 に示されているように、大気境界層と積雲が発達していた午後には、大気下層において急激に大気水蒸気量が減少し、大気上層では増加するという日変化が観測された。積雲対流により鉛直方向の水蒸気輸送が強められ、水蒸気量の多い下層大気と少ない上層大気の鉛直混合が強められたと考えられる。一方で、大気水蒸気量の日中における減少が、地表面近傍では 9 時頃に始まるのに対し、高度 0.7 km ではそれよりも早い時刻の 6 時頃に始まることは、局地循環の影響を示唆している。つまり、地表面に近い大気の層では、地表面からの蒸発散によって大気水蒸気量が増加するが、局地循環が形成されて地表面近傍よりも少し高い高度において乾燥空気が移流した場合は、その高度において大気水蒸気量が減少を始めたというように考えられる。局地循環が大気水蒸気量の日変化に与える影響については、チベット高原 (Takagi et al., 2000) や、スマトラ島の山地 (Wu et al., 2003)、タイの沿岸部 (Fujita et al., 2006) などで報告されている。黄土高原では、地形の起伏のスケールが 100 m 程度であり、大規模な局地循環は発生しにくいと考えられるが、台地の縁辺部では対流が生じやすいことから (Zängle and Chico, 2006)、これによる小スケールの局地循環が形成されている可能性がある。

4. まとめ

黄土高原南部では、降水によって地表面にもたらされた水は、そのおよそ 8 割が蒸発散によって地表面から大気へ返還されていた。季節ごとにみると、夏季と秋季では、降水量が蒸発散量を大き

く上回るために表層土壌は湿潤になる一方、冬季と春季では、蒸発散量が降水量を上回るために表層土壌は乾燥していた。このように、夏季と秋季の降水は、一部は蒸発散によってただちに大気へ返還されるが、すべてが返還されるのではなく、ある程度土壌を湿潤な状態に維持して、冬季と春季の間に徐々に大気へ返還される。冬季と春季にはほとんど降水がないが、春季になるにしたがい放射量が強く植物活動が活発になるので、蒸発散量が大きくなる。春季に植物が利用できる水が存在することは、植物の成長、特にこの時期に急激に成長する冬小麦にとって重要である。夏季の降水量を時間帯別に積算することで、明瞭な日変化があることが確認された。2004年と2007年では、日中に少なく朝方と夜に多いという日変化を示し、2005年では日中にも多い日変化を示した。全ての年で夜に大きなピークがあり、日中に発達した対流活動の影響である可能性が考えられた。

日中对流活動が強まることにより、積雲の発達と大気水蒸気量の日変化が生じた。夏季の黄土高原南部では、雄大積雲が発達した日に、地表面近傍を除く高度1km以下の大気下層において大気水蒸気量が減少し、それより上層の大気において大気水蒸気量が増加する現象が観測された。これには、大気境界層が日中に発達することに加えて、台地と谷に形成される小スケールの局地循環、および積雲対流により、大気下層の湿度の高い空気が湿度の低い上層大気と混合されたことにより生じたものと考えられた。これにより、大気境界層と自由大気間における水蒸気交換が活発になることが示唆された。

こうした大気水蒸気の輸送が総観気象場とどのように関係し、黄河中流域の水循環変動にどの程度影響しているのかについて定量的に明らかにするために、さらに研究をすすめる必要がある。

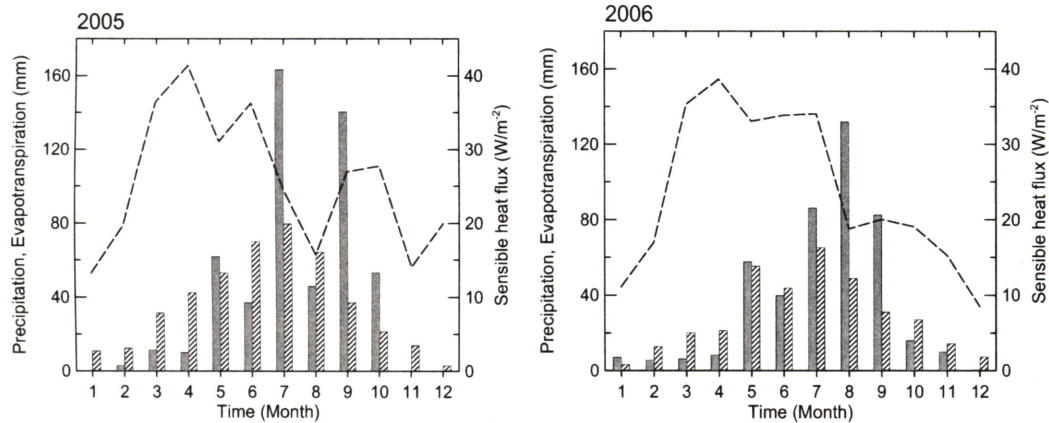


図1. 2005年と2006年における月ごとの総降水量（棒グラフ：灰色）、総蒸発散量（棒グラフ：斜線）、月平均顕熱フラックス（破線）の季節変化。

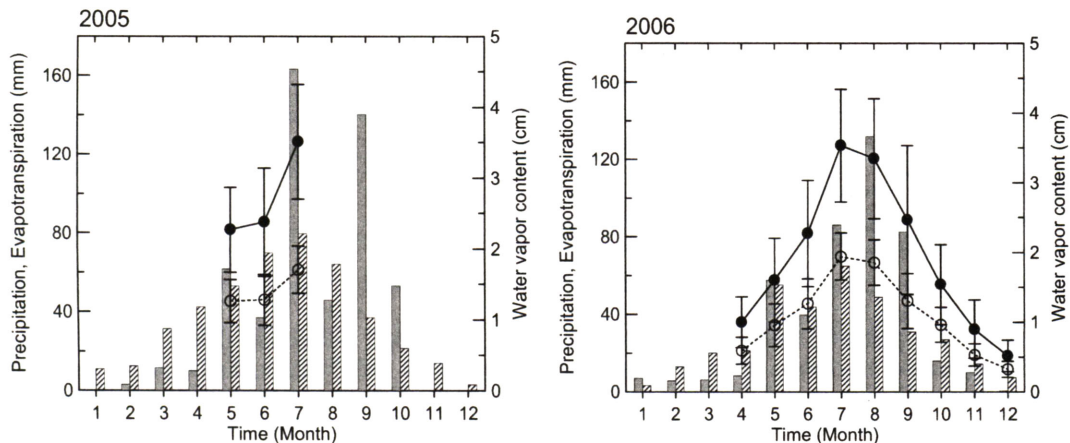


図2. 2005年と2006年における月ごとの総降水量（棒グラフ：灰色）、総蒸発散量（棒グラフ：斜線）、月平均大気水蒸気量（黒丸：0-10km、白抜き丸：0-2km）の季節変化。

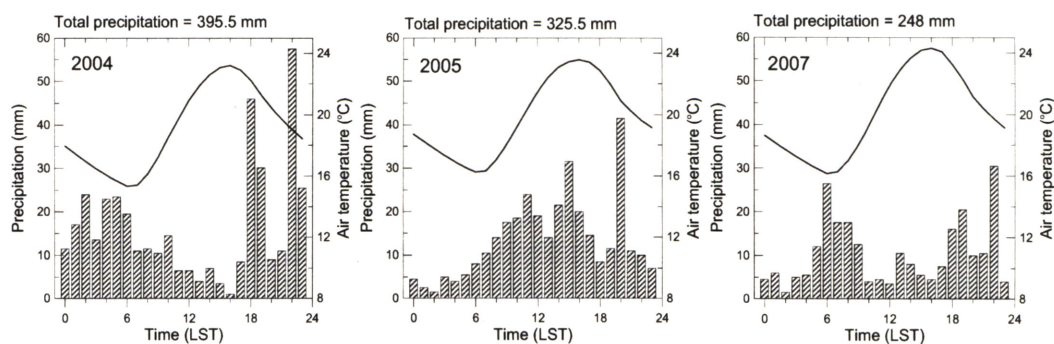


図3. 2004年、2005年、2007年の6月から9月の4ヶ月間における、各時間帯の総降水量（棒グラフ：斜線）と同期間における時間ごとの平均気温（実線）。

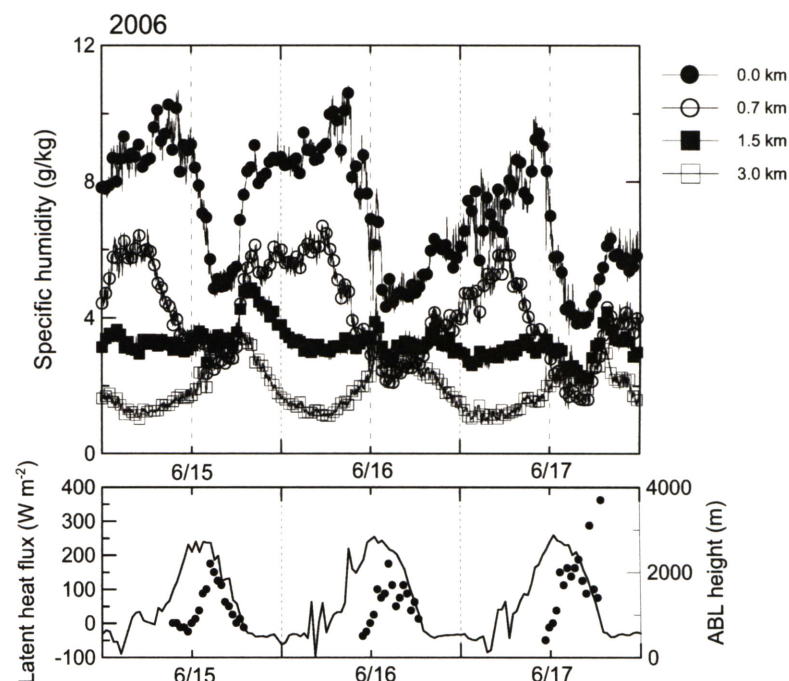


図4. 2006年6月15, 16, 17日に観測された4高度における比湿（上）と潜熱フラックス（下、実線）、大気境界層高度（下、黒丸）の日変化。

参考文献

- Fujita, M., T. Sasaki, and F. Kimura (2006): A dramatic daytime decrease in water vapor over coastal Thailand, *SOLA*, 2, 49-52.
- Nishikawa, M., T. Hiyama, A. Takahashi, W. Li, A. Higuchi, W. Liu, and Y. Fukushima (2005): Characteristics of vertical wind observed within and over the convective boundary layer on the Loess Plateau, China, *Proceedings of the Third Japan-China Joint Workshop on Lower Atmosphere and Precipitation Study (LAPS)*, Nagoya, Japan, 105-106.
- 大和田春樹, 大森博雄, 松本淳 (2005): 中国黄土高原の降雨季における気流系の季節変化について. 地理学評論, 78, 534-541.
- Takagi, T., F. Kimura, and S. Kono (2000): Diurnal variation of GPS precipitable water at Lhasa in premonsoon and monsoon period, *J. Meteor. Soc. Japan*, 25, 175-180.
- Takahashi, A., T. Hiyama, M. Nishikawa, A. Higuchi, W. Li, W. Liu, and Y. Fukushima (2007): Vertical mixing of water between the atmospheric boundary layer and free atmosphere over Changwu, the Loess Plateau of China, *Proceedings of 3rd International Workshop on Yellow River Studies*, February 14-15, 2007 Kyoto, 73-76.
- Wu, P., S. Hamada, S. Mori, Yudi I. Tauhid, M. D. Yamanaka, and F. Kimura (2003): Diurnal variation of precipitable water over a mountainous area of Sumatra Island, *J. Appl. Meteor.*, 42, 1107-1115.
- Zängle, G. and S. G. Chico (2006): The thermal circulation of a grand plateau: sensitivity to the height, width, and shape of the plateau, *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2581-2600.