

中国穀倉地帯における水循環過程に基づいた水資源の評価とその持続的利用

Water Resources Evaluation and its Sustainable Utilization Depending on Hydrological Processes in a Crop Field in China

田中 正*・嶋田 純**・近藤昭彦***・佐倉保夫***・唐 常源***・芝野博文****

Tadashi TANAKA, Jun SHIMADA, Akihiko KONDOH, Yasuo SAKURA, Changyuang TANG and Hirofumi SHIBANO
*筑波大学・**熊本大学・***千葉大学・****東京大学
University of Tsukuba, Kumamoto University, Chiba University, University of Tokyo

The North China Plain, which develops from left bank of Yellow river to the south of the Beijing and Tianjin, is one of the important crop land area in the present China. Because of their water scarcity under their hydrological conditions, peoples have been pumped huge amount of groundwater not only for irrigation but also for city water and industrial water uses. This has created a large scale of groundwater draw-down during recent few ten years and has become one of big environmental problems which must be cleared urgently for the sustainable use of groundwater resources. For this purpose, the understanding of groundwater flow system in this area becomes quite important. This paper explains the results of field investigations to make clarify the groundwater flow system in the NCP and discusses some counter measures for sustainable use of groundwater resources in the study area.

1. 研究目的

人口の爆発的な増加に伴い、世界の食糧危機が懸念されている。特に、世界の食糧需給の不安定要因として中国の人口増加や環境の悪化、食糧不足が国際社会に与える深刻さが指摘されている。この中国における人口→環境→食糧という一連の食糧連鎖の危機は、中国の穀倉地帯における的確な水資源の評価とその有効利用に懸かっている。特に、食糧生産の基盤となる農業用水を安定的に確保することは緊急かつ不可欠な課題である。中国の一大穀倉地帯である華北平原では水資源、特に地表水が不足しており、現在の農業・産業・都市用水はほとんど地下水に頼っている状況であり、しかも地下水位は年々低下しつつある。こうした状況に鑑み、本研究では、水循環の一環としての地下水循環に焦点を合わせ、地下水流動の実態を把握するとともに、水資源としての地下水の役割を明らかにすることを研究の目的とした。

2. 研究経過

1999年8月および2000年12月に華北平原において現地調査を実施した。1999年8月には華北平原の48ヶ所の簡易水道水源および農業用の井戸より地下水を採水するとともに、現地で確認できる範囲で井戸の深さ、スクリーンの位置、GPSによる緯度・経度の把握、簡易水質計によるpH、

電気伝導度、水温の測定を行った。また、現地において炭素14分析用に炭酸バリウムの沈殿処理、トリチウム、水素・酸素の安定同位体、無機イオン測定用にそれぞれ採水を行った。また、2000年12月には補足調査を実施し、37地点において地下水を採水するとともに同様な調査を実施した。

また、現地調査に際し、関連資料の収集を行い、調査範囲42地点の30年間分の降水量データ、41地点における20年間分の可能蒸発散量データおよび5県における14年分の水使用量データを収集した。

2000年12月の調査に際しては、石家庄市正定の水文地質学・環境地質学研究所において、ワークショップ「華北平原における水資源の持続可能な開発」を開催し、研究成果について意見を交換するとともに、華北平原の水問題に関する情報を収集した。

3. 研究成果

3.1 降水量

華北平原の年降水量は400~600mm程度である。降水は季節的に偏在しており、6月終わりから9月中旬の降水量が年降水量の70%を占める。主要穀物である小麦の生育期である春は降水量が少なく、これが灌漑用地下水の大量揚水を引き起こしている原因の一つである。

3.2 蒸発散量

河北省の41ヶ所の気象観測データを用いて Penmen-Monteith法による可能蒸発散量を計算し、Thorntwaiteの水収支法により実蒸発散量を求めた。計算された実蒸発散量は803~891mm/年の範囲にあり、可能蒸発散量に対する比である蒸発比は平均で0.79となった。この値は報告されている Crop Coefficient とほぼ同程度の値であり (Shen and Yang, 1998; Liu et al., 1998)、華北平原では0.8程度が代表的な値であると考えられる。

蒸発比が0.8ということは大気の乾燥力が強まっていることを意味している (近藤ほか, 2001)。800mmを超える蒸発散量は降水量を上回っており、灌漑用水からの大気への水蒸気輸送が無視できない量であることを表している。

3.3 黄河の断流

華北平原を貫く黄河の水が河口まで達することなく途絶えてしまうことはよく知られており、「断流」と呼ばれている。1972年に最初の断流が発生してから、その回数は年々増加しており、1995年には干しあがった河床の総延長は662kmに達した。1980年代までは5月ないし6月に断流が発生したが、1990年代には2月から4月に発生するようになり、洪水シーズンの7・8月にも発生するようになった。断流の継続時間は徐々に長くなっており、1995年には122日、1996年には136日に達し、河口からの無水区間は上流へ700kmも続いた。1997年には2月7日に断流が始まり、6月は全月断流、7月には17日間の断流が発生した。1998年には長江で大洪水が発生したが、Lijiangにおける断流期間は9月30日時点で124日に達した。

3.4 地下水利用の現状とその影響

黄河の断流に象徴されるように、表流水が期待できない華北平原の農業においては、灌漑用水は地下水に頼ることになる。華北平原では地下水の帯水層は4層あり、それぞれ深度30~50m、100~150m、250~300m、300~500mの深度に分布している (Tian, et al., 1998)。このうち、第1と第2帯水層が主要な生産層であるが、渤海湾沿岸部では浅層に塩水が広く分布しており、淡水の利用は深層地下水に限られている。

1980年から1993年までの河北省の平原部にお

ける総地下水揚水量は $1410.33 \times 10^8 \text{m}^3$ 、年平均揚水量は $100.74 \times 10^8 \text{m}^3$ であり、年間の過剰揚水量は $9.06 \times 10^8 \text{m}^3$ で9.9%の過剰となっている (Tian et al., 1998)。

過剰揚水の結果が地下水位の低下であるが、石家庄の南約30kmの楽城における観測井の水位記録によると (Mao and Liu, 2000)、この地域の1950年代の地下水は地表面下2~3mほどであったが、その後は一方的に低下を続け、地下水位の低下速度は年間1mに達している。また、調査地域における地下水位分布の面積率によると (Tian et al., 1998)、地下水面深度が4m未満の地域は1964年には全体の98%を占めていた。しかし、1964年から1993年にかけて地下水面深度が4m未満の地域は一貫して減少し、1993年には20%を下回っている。一方で、地下水面が深い地域は拡大しており、地下水面が20m以深の地域も1993年には13%に達している。

地下水位の低下は地盤沈下を引き起こし、農地では大規模な亀裂も発生している。また、沿岸部では海水の侵入も認められ、上層の塩水が下層の帯水層に流入する現象も発生している。

3.5 地下水流動の実態

3.5.1 放射性環境同位体の測定結果とその分布特性

半減期12.43年のトリチウムと半減期5730年の炭素14の測定結果は、いずれも深度の増大に伴って濃度が低下する傾向が認められた。トリチウムと炭素14の相関図はその濃度の傾向が一致しており、いずれも起源を同じくするものと解釈された (嶋田, 2001)。

これらの環境同位体の空間分布は、トリチウムで10T.U.、炭素14で30pmcより高い濃度地域はほぼ一致しており、これらの地域は最近の核実験に伴う濃度上昇の影響を持つ降水が涵養されている地域 (bomb front) と考えられる。これらの地域はいずれも太行山東麓の扇状地性堆積物地域で、調査地域の地下水涵養域に相当する場所に当たっている。

今、これらのbomb frontの位置と涵養域である太行山東麓扇状地の扇頂との距離を50kmとすると、核実験の盛んな1965年から採水時点の1999年までの約35年間にこの距離を地下水が帯水層中を移動したと解釈することができ、その速度は

4m/日となる(嶋田, 2001)。この値は研究地域の平均透水係数と自然状態での動水勾配とから得られる地下水流速の 10~1000 倍程度速いものとなっており、灌漑揚水に伴う急激な地下水低下によって生じた強制的な地下水流動がもたらした結果と判断される。

3. 5. 2 安定同位体比の測定結果

調査地域地下水の酸素の同位体比を炭素 14 濃度から放射減衰のみを基に算出した地下水年齢(Libby 年代)に対する関係をみると、涵養域である太行山東麓扇状地域では、地下水年齢が若く、その安定同位体比は現在の降水中の同位体レベルである -8‰ ($\delta^{18}\text{O}$) 近くであるのに対し、地下水年齢が高く、水質進化の認められる調査地域東部の深層地下水の同位体比は平均 -10‰ ($\delta^{18}\text{O}$) 近くで、その炭素 14 年齢は 2~3 万年を示している(嶋田, 2001)。これらの酸素同位体比の違いは、涵養時期の気候(気温)の違いを反映していると考えられ、これまでの研究結果によれば ($0.5\text{‰}/1^{\circ}\text{C}$, Rozanski, 1985)、酸素で 2‰ の差はおよそ 4°C 現在よりも寒冷気候下にあったことを示している。これらの結果は、最終氷期以降現在の間氷期までの調査地域の気温変化特性が地下水に保存されていることを示している。

4. 今後の課題と発展

華北平原の地下水には数千~数万年前の寒冷気候下に涵養された水が広範囲に存在しており、調査地域の平均動水勾配と現在の降水量から見積もられる涵養量を考え合わせると、自然状態では非常に緩慢な地下水流動であったことが想定される。これに対して、現在の地下水利用状態は自然の涵養量をはるかに上回る過剰揚水が行われており、大規模な地下水位・水頭低下をきたしている。このような地下水利用状態がこのまま今後も継続すれば、近い将来広域的な地盤沈下、地下水の塩水化等の地下水障害が顕在化することは明らかである。地下水資源の抜本的な評価と利用のあり方を早急に検討する必要がある。

華北平原の水資源問題に対しては、中国の研究機関によって様々な対策が考案され、一部はすでに実施されつつある。華北平原の水資源対策は、平原部における節水農業、山地における水取水技術、そして水の豊富な南部からの導水、すなわち

“南水北調”の三つに大きく分けることができる(近藤ほか, 2001)、中でも節水農業は地下水資源を持続的に利用するための対策として最も有力な方法と考えられる。

節水農業としての灌漑技術について、現在華北平原で広く行われている手法は地表灌漑である。この方法は施設投資は安い水の水の損失が多く、水管理を徹底しないとウォーターロギングや塩類集積を引き起こしやすい。スプリンクラー等の散水灌漑、点滴灌漑等のマイクロ灌漑は高度な技術であり、コストの問題もあり、普及には至っていない。このことは、華北平原の地下水は節水の余地が残されていることを意味している。また、灌漑のタイミング、量と生産高にはある関係があり、少ない灌漑量で生産性をあげる組み合わせが存在することが明らかにされており(Chen and Wang, 1998)、この組み合わせを求めることが節水農業を実現するために必要である。さらに、地表面蒸発は穀物の生産に利用されないため、食糧生産にとっては無効な水分である。これを防ぐためにストローマルチを施す方法が考えられ、ストローマルチを施した畑においては蒸発散量を抑制できることが明らかにされている(Shen and Yang, 1998)。こうした灌漑技術の改良、灌漑スケジュール管理、ストローマルチの奨励等の対策が今後地下水資源を持続的に利用するための対策として有効であるものと考えられる。

引用文献

- 嶋田 純(2001): 中国河北平野の地下水実態調査結果。(未発表)。
近藤昭彦・ほか(2001): 中国華北平原の水問題。(未発表)。
Chen, S. and Wang, S. (1998): Study of the soil water retention of a Thousand-Jin wheat field in the drab region of the plain before the Taihang Mountain. *Proc. Int. Workshop on Methods of Field Investigation of Water Cycle and China-Japan NCP Project, Sijiazhuang, China, June 1998*, 125-131.
Liu, C., Zhang, Z. and You, M. (1998): Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by large scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Ibid*, 106-110.

- Mao, X. and Liu, C. (2000): Groundwater changing trends and agriculture sustainable development in Taihang Mountain-foot plain of North China. *Proc. Int. Workshop on Sustainable Development of Water Resources in North China Plain, Zhengding, Hebei, China, Dec. 8, 2000*, 26-31.
- Rozanski, K. (1985): Deuterium and oxygen-18 in European groundwaters—links to atmospheric circulation in the past. *Chemical Geology*, 52, 349-363.
- Shen, Y. and Yang, Y. (1998): The effect of agricultural water saving on hydrological cycle: Taking Luancheng for an instance. *Proc. Int. Workshop on Methods of Field Investigation of Water Cycle and China-Japan NCP Project, Shijiazhuang, China, June 1998*, 99-105.
- Tian, K., Li, H., Cao, J. and Han, S. (1998): The hydroenvironment and agriculture in the Haie catchment plain. *Ibid*, 11-28.
- Ibid*, 20-24.
- Tanaka, T., Yang, Y., Wang, H., Liu, C. and Song, X. (2000): Regional characteristics of climatic and hydrologic conditions in the Hebei plain. *Ibid*, 1-4.
- Tang, C., Chen, J., Shimada, J., Tanaka, T., Sakura, Y., Zhang, G., Song, X., Yang, Y. and Tian, K. (2000): A primary study on nitrate in groundwater used for agriculture and urban life in NCP. *Ibid*, 40-43.

发表論文

- Kondoh, A., Shen, Y. and NCP 38N Project Group (2000): Monitoring surface moisture and vegetation status by NOAA and GMS over North China plain. *Proc. Int. Workshop on Sustainable Development of Water Resources in North China Plain, Zhengding, Hebei, China, Dec. 8, 2000*, 5-10.
- Li, F., Shibano, H., Zhang, W. and Yang, Y. (2000): Rainfall-runoff relationship in a small catchment of Taihang mountain. *Ibid*, 11-15.
- Sakura, Y., Tang, C., Tanaka, T., Shimada, J., Song, X., Yang, Y., Tian, K., Zhang, G. and Sun, J. (2000): A preliminary study on mechanism of salinization influenced by groundwater flow system in NCP. *Ibid*, 45-46.
- Shimada, J., Tang, C., Iwatsuki, T., Tanaka, T., Sakura, Y., Song, X., Yang, Y., Tian, K., Zhang, G. and Sun, J. (2000): Groundwater flow system of Hebei plain area—Preliminary results revealed by environmental isotopes.