

## 中日高効率施肥と環境評価協力 20 年間の回顧と展望

徐明崗<sup>1,2</sup>、李玲<sup>1</sup>、段英華<sup>1</sup>、錢小平<sup>3</sup>、三島慎一郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>農業資源与農業区劃研究所、CAAS、耕地質量栽培技術国家プログラムラボ；<sup>2</sup>中国熱帯農業科学院南亜熱帯作物研究所；<sup>3</sup>JIRCAS；<sup>4</sup>日本農業環境技術研究所

### Abstract

Chemical fertilizer plays a very important role in promoting agricultural production and food security. However, currently the amount of fertilizer used is too large and the utilization efficiency of fertilizer is low. As a result, chemical fertilizer has become a major source of agricultural pollution. In order to coordinate the relationship between agricultural development and environmental protection, China and Japan have carried out a series of studies on efficient fertilization and environmental assessment since 1997-2016. This paper reviews the main research achievements of the 20 years of Sino-Japanese cooperation, expounds the main achievements and revelations of the 20 years of cooperation, and puts forward some thoughts and suggestions for future cooperation. It suggests some new ideas for Sino-Japanese cooperation in future with high quality production and environmental protection in agriculture in mind.

化学肥料は食糧の「食糧」として、農業生産の促進と食糧安全において、重要なサポート的な役割を果たしてきた（張福鎖等、2008）、とりわけ中国は世界7%の耕地で世界人口の22%を養っているという奇跡を起こした背景には、化学肥料が食糧生産の安定に大きく貢献している。食糧増産への貢献率は40%以上（朱兆良等、2013）とされる。現在中国農地化学肥料施用量は世界平均使用量の三倍以上で、化学肥料の利用率が低く、さらに窒素肥料の利用率は35%未満で、世界平均より15-20%も低い。肥料利用率の低さより、大量の養分とりわけ窒素養分は空気と水で流失し、重要な汚染源となった。農業発展と環境保護の関係を改善するために、中日双方は1997-2016年において、「環境保護型農業生産技術の開発と評価」及び「中国典型農地における化学肥料の環境リスク評価と施肥技術」等の研究を行い、中国の主要農作制度における化学肥料の損失状況を究明、同時に土壤養分資源の環境リスクを分析、化学肥料の流失を低減させる技術措施を提案、科学的な施肥及び養分資源の管理を改善、化学肥料の利用率を向上させ、農地の生態環境を守ることができた。

---

原稿提出日付：2018-08-31

作者プロフィール：徐明崗（1961-），男，陝西武功出身，研究員。研究方向：土壤肥力の変化と退化した土壤の回復。Email：[xuminggang@caas.cn](mailto:xuminggang@caas.cn)

支援プロジェクト：国家重点研究開発計画プロジェクト（2016YFE0112700）和中-日国際協力プロジェクト「華北農田環境負荷評価」等。

## 1 中日高効率施肥と環境評価研究成果を振り返る

### 1) 環境保護型農業生産技術の開発と評価研究（1997年-2003年）

施肥の目的は農作物の生産量を増やし、人類の発展が必要な食糧を確保するためである。しかし最近30年来、中国化学肥料の使用量は継続的に増加したが、食糧生産量の増加は逆に緩やかになった（張福鎖等、2008）。同時に化学肥料の非合理的な使用によって、環境汚染の問題がますます浮き彫りになった（陸文聡等、2017；劉钦普、2017）。化学肥料の使用と環境の関係を改善するため、1997年から2003年まで、中日双方は7年間にわたる中日政府間の協力プロジェクト「中国主要食糧資源の持続生産と高度利用」をテーマにした研究を実行し、その内容のひとつとして「環境保全型農業生産技術の開発と評価」があった。この部分の内容は中国農業科学院土壤肥料研究所、中国科学院南京土壤研究所と日本国際農林水産業研究センター、日本農業環境技術研究所等の機関が協力して完成したものである。本プロジェクトは中-日協力の新紀元を作り、中日農業科学技術協力の代表的プロジェクトであった。本プロジェクトの協力研究は、主に以下の研究成果が得られた。

#### (1) わが国の主要農作制度における化学肥料中窒素の流失ルートの解明

化学肥料が土壤に使われてから、一部は農作物に吸収され、一部は土壤の中に保全され、その他は化学肥料の流失部分と見なされている。流失した部分は空気に揮発し、地下水に溶脱し、または地表水にも入ってしまう（朱兆良、2000；Guo et al., 2004；周建斌、2017；巨晓棠等、2014；徐明崗等、2015）。

中国北方地域の小麦-トウモロコシの輪作制度において、アンモニアの揮発は主に気温が比較的に高いトウモロコシの生育期に発生し、窒素の流失率は19.4-71.3%の間である。しかし小麦生育期における窒素の流失率はわずか1.4-2.1%。中国南方地域の二期作米輪作制度において、早い時期の稲と遅い時期の稲の生育期におけるアンモニアの流失率は非常に近く、約25-41%（平均は35%）である。

窒素の溶脱は南、北問わず低い数値を維持し、損失率はわずか2%ぐらいである。中国北方地域の小麦-トウモロコシ輪作制度において、尿素が土壤に吸収されるとすぐアンモニウムに変わり、アンモニアは引き続き硝酸態窒素に変化し、アンモニウム含有量はすぐに低下し、二週間後低い数値に安定するが、硝酸態窒素の含有量が徐々に高くなり、その後はアンモニウム含有量と比べ、終始比較的に高いレベルを維持している。上記でわかることは、華北地域の灌漑システムを使っている農地において、土壤中の可給態窒素は硝酸態窒素がメインである。アンモニウム含有量が高くなく、土壤に吸着されることもあるため、灌漑農地の窒素溶脱は主に硝酸態窒素の溶脱である。南方地域の二期作米輪作制度において、水稻生育期の水田は比較的に長い期間にある程度の水層を保有し、同時にある程度浸み出ているため、窒素溶脱の現象もあるが、窒素の溶脱量はわずか施肥量の1.4%である。

中国の南方地域は水稻の栽培がメインで、農地は一年中何回もの進水と排水を繰り返し、一部の丘陵地域では串灌（水盤灌漑）の方法を使用している。さらに南の降水量が多く、地表を流れ去る雨水の量も多いため、南では農地の表面に溶け込んだ窒素は雨水に流される。そのため、地表の雨水による損失も南の丘陵地区の窒素流失の重要ルートである、窒

素流失率は 8.4%-11.2%である。

## (2) 緩効性肥料と有機肥料使用中の窒素利用率を究明し、環境保全型施肥新技術を提案

緩効性肥料を施肥することで、肥料の流失を大幅に低減させることができ、肥料の利用効率を向上できる（盧艶麗等、2011；侯紅乾等、2018；徐明崗等、2015）、しかし異なる作物に対する増産効果もかなりの差があり、異なる作物における応用見通しも違う。中国北方地域の小麦—トウモロコシ輪作制度に、Meister 緩効性肥料を使用した小麦生産量は尿素より低く、緩効性肥料の小麦に対する増産作用は尿素ほど大きくないと証明している。各処理によるトウモロコシ生産量の差はあまりなかった。緩効性肥料は尿素と同じ生産量を維持するという条件の下で、窒素の揮発を大きく抑えたため、とりわけ Meister150 kg N/hm<sup>2</sup> による処理は、普通の使用量で肥料の利用効率を 6.9-13.3%向上させることができ、生産量は同量の尿素と一致、或いはやや高くなっている。中国南方の二期作米輪作制度において、緩効性肥料 75kg N/ha を使用した状態で、生産量は 150 Kg N/ha の尿素を使った時と同じレベルに達することができ、肥料の利用率は約倍になり（尿素窒素の利用率は 25-35%、平均は 30%；緩効性肥料窒素の利用率は 65-75%、平均は約 70%）、応用の見通しは非常に明るい。

有機肥料と無機肥料を配合して使用することによって窒素の流失を減少させ、化学肥料の利用効率を向上させる重要な役割を果たす（徐明崗等、2015；張淑香等、2015）。中国南方地域の二期作米輪作制度の研究では、水稻生育期間中のアンモニア揮発流失量、窒素量が同じな場合、早生稲をターゲットに化学肥料だけを使う（NPK）場合と化学肥料と有機肥料（NPKM）を融合した肥料を使う場合、アンモニア揮発の窒素損失量はそれぞれ施肥量の 37.7%と 18.2%を占め、有機肥料（M）を使用した場合アンモニアの揮発量は窒素肥料施肥量の 0.7%しかない。晩生稲の NPK 処理における、アンモニア揮発窒素流失量は施肥量の 37.9%を占め、NPKM と M 処理のアンモニア揮発流失量が少なく、それぞれ施肥量の 7.2%と 1.0%を占める。異なる施肥処理による窒素肥料の利用効率も明らかに違い、5年間試験の平均値は、化学肥料だけを使用する場合の窒素利用率はわずか 26.2%、有機肥料と無機、有機肥料を配合した場合の窒素利用率が比較的に高く、それぞれ 35.4%と 37.8%である。総生産量から見ると、有機無機肥料を配合した場合は一番高く、化学肥料より 8.3%増産した。有機無機を配合した肥料は稲の生産量を効率的に改善できるだけでなく、窒素肥料の利用効率を著しく向上させることができ、農業生産の持続可能な発展を実現するための重要な施肥方式である。

## 2) 中国典型的農地化学肥料の環境リスク評価と施肥技術研究（2004年-2016年）

化学肥料使用量が著しく増加し、環境汚染が日々進み、とりわけ中国では化学肥料の使用量が高いため、農地地における化学肥料汚染問題の先進国より目立っていて、農業の窒素とリンは水体富栄養化への主な原因で（劉欽普、2014）、農業で排出したアンモニアは空気中で硫酸アンモニウムと硝酸アンモニウムを形成し、スモッグの成分となり、大気透明度に影響する重要物質である（白由路、2018）。健全な農地の生態システムと農業持続可能な発展のため、中日双方は第二期協力プロジェクト「中国典型農地における化学肥料の環

境リスク評価と施肥技術」を展開し、執行期間は2004年-2016年。本期間での研究はデータ収集、調査研究をメインにして、典型的な農地における土壌養分の環境リスク分析研究を行い、農地の土壌養分のバランス状況を究明し、さらにその環境リスクの特徴を明確する。本期プロジェクトの協力研究は、おもに以下の研究成果があった。

(1) 河北省における異なる利用方式での土壌窒素、リン養分の投入と余剰状況

河北省の野菜畑と食糧生産農地の窒素、リンは主に化学肥料から由来であり、化学肥料が総施肥量に占める割合は70%以上である。食糧生産農地、果樹園と野菜畑の窒素、リンはいずれも余った状態で、窒素の余剰率は果樹園が一番高く(532.6%)、続いては野菜畑と食糧生産農地(61.5%と31.6%)である。リン肥の余剰率は野菜畑と果樹園が一番高く(700.4%と615.7%)、食糧生産農地が一番低い(66.6%)。全体的に見るとリン肥の余剰率は窒素肥料より高い(李玲等、2016)。

(2) 窒素、リン養分の環境リスク指数を明確した

窒素の余剰率が20%以上だと、環境に潜在的脅威をもたらすため、リンとの余剰率を合わせて、最大は150%を超えてはいけない(Zhao et al., 2009)。河北省の野菜畑と果樹園の窒素、リン肥余剰率はすでに基準を大きくオーバーし、環境に対する潜在的脅威も比較的に大きい。同時に環境リスク指数0.5を安全数値とし、0.5以下だと環境にリスクはないと判断する(劉钦普、2014)。河北省野菜畑、果樹園と食糧生産農地の三種類の異なる利用方式の窒素肥料とリン肥の環境リスクはいずれも0.5を超えている(李玲等、2016)。そのうち食糧生産農地の窒素、リンの環境リスクは低度リスク、果樹園の窒素、リンの環境リスクは中度リスク、野菜畑の窒素、リンの環境リスクはすでに嚴重リスクに達している。そのため、河北省は窒素、リン肥の投入を減少し、土壌をよりよく培うために、有機肥料の投入率を引き上げるべきである(李玲等、2016; 徐明崗等、2015)。

## 2 中日高効率施肥と環境評価が20年間の協力で得た収穫と感想

中日高効率施肥と環境保護は20年間の協力を経て、中国の研究能力と研究水準を著しく引き上げられた。とりわけ緩効性肥料に関する研究は、緩効性肥料の窒素コントロール原理と異なる地域、異なる栽培システムにおける高効率施肥技術を実現し、国際先進レベルに達している。黄淮海平原の農地と華中水田の窒素肥料環境保全型施肥技術は、農業部科学技術進歩二等賞を獲得した。協力によって、多くの人才を輩出した。20年間、双方交流した人数は80人以上、国際的ワークショップを9回開催し、中-日土壌環境評価と保護の国際影響力を著しく向上させ、双方の文化交流と友情を深めた。協力した20年、中日双方は資源の共有を実現し、優位性を補完し合い、長期的な友好協力パートナーシップ関係を築いた。これからも科学研究プロジェクトを協力し、参加する人数が多くなるに連れ、双方は中日友好と中日科学技術イノベーションに更なる大きな貢献ができると思う。

### 3 これから中日科学技術協力に関する考えと意見

現代農業の発展とともに、良質、高効率、利便性、環境保全などに関する要求もますます高くなり、中日双方は農業資源環境分野、とりわけ高効率施肥と環境保全における協力がますます広くなり、多元化になってきた。中日双方の優位性と農業生産の新しい需要を総合的に考えると、未来の協力ポイントを以下の視点に集約できると思う。

#### 1) 高効率施肥技術の研究と応用

高効率施肥は作物栄養供給の各プロセスに使われ、現代的技術を使って、肥料の利用率を最大限に引き上げ、作物の生産量と品質の向上を保証するだけでなく、資源のロス問題を解決し、生態環境を守る（自由路、2018）。現在農業生産で実際に効果を見せている高効率施肥技術は主に測土施肥技術、精確的施肥技術、灌漑施肥技術、軽減式施肥技術、葉面施肥技術等がある。特に科学技術の発展とともに、高効率栄養診断技術、デジタル化養分管理システム、養分高効率利用遺伝子選択、栄養チェーンの一体化管理、作物栄養調節技術と生態環境保護の施肥技術等は将来高効率施肥技術研究と応用の主要方向になると思われる（自由路、2018）。そのため、中日双方は異なる農業地域、特定な作物システムに対し、環境友好型の高効率施肥技術を取り入れ、とりわけ簡素化した、自動的、機械化したセット技術を導入し、広い地域において展示応用を展開し、科学技術のサポートを強化し、エコで良質な高効率新技術を広めていく。

#### 2) 新型肥料の研究開発と応用

新型肥料開発の重点分野は以下のとおりで、新型緩効性肥料、微生物肥料等がある。緩効性肥料とは肥料に含まれる養分の放出速度が緩やかで、放出周期が長く、異なる作物の肥料を必要とする特性及び成長規則に基づいて、物理的、化学的そして生物学等の技術で養分の放出を調節し、コントロールし、成長期全体の需要に応えられる肥料である。そのため緩効性肥料は「21世紀新型環境保全肥料」とも呼ばれている（李玲等、2016）。緩効性肥料には化学肥料の利用率を向上させ、使用量と施肥回数を減少し、生産コストを低減させ、環境汚染を改善し、農作物の品質を向上させる等のメリットがあり（盧艷麗等、2011；侯紅乾等、2018；張德奇等、2010）。微生物肥料とは一部の活着している微生物が含まれている特定製品のことで、農業生産に用いられると、作物は特定な肥料の効果を感じることができ、その微生物の働きは一番肝心である。微生物肥料は新型肥料として、土壌に投入後、特定な菌株迅速に繁殖し、空気中の窒素を固定させ、土壌中に固定したリン、カリウム元素を放出し、環境に潜めている養分を十分に発揮できる。さらに作物の成長のために素晴らしい微生物環境を作り、化学肥料使用量の削減、環境汚染の改善、農作物品質の向上等において重要な意義を持っている（王素英等、2003；張瑞福等、2013）。新型肥料研究と産業化発展を促進するには、科学者と肥料業界の共なる努力が必要である。中日双方は関連の科学研究機関と科学技術革新能力を強化し、新型肥料研究開発の投資を増やし、新型肥料の研究開発プラットフォームを構築し、新型肥料の研究開発プロジェクトを取り入れた技術センターを創設するなど、産学研を結びつけた新しい科学研究のパターンを構築し、共に新型肥料の開発と応用を促進し、肥料の利用率を著しく向上させ、施肥がもたらす環境の悪影響を最低限に抑える（趙秉強等、2004）。

### 3) 国際会議の開催と人才育成

双方の20年間の協力を基礎に、引き続き協力と交流を促進し、とりわけ資源の効率的な利用と環境保全に関する技術交流と協力を深めるためには、人才、新技術、情報交換と協力を注目しなければならない。「持っている技術を海外に、持っていない技術を国内に」という発展の考え方に基づいて、中日双方は引き続き調査研究を展開し、毎年5-8人の交流を維持し、2-3年に一回関連の国際会議を開催する。同時に双方は大学院生の育成においても、共同で行い、大学院生のレベルと質を向上させ、長期にわたる協力協栄を実現する。中日農業科学技術の発展と中日友好のために積極的に貢献する。

#### 参考文献

- 1 Guo H Y, Zhu J G, Wang X R, et al, 2004, Case study on nitrogen and phosphorus emissions from paddy field in Taihu region, *Environmental Geochemistry and Health*, 26(2):209-219.
- 2 Zhao L, Ma Y, Liang G, et al, 2009, Phosphorus efficacy in four Chinese long-term experiments with different soil properties and climate characteristics, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40: 3121-3138
- 3 自由路, 2018: 高効施肥技術研究的現状与展望, *中国農業科学*, 51(11):2116-2125
- 4 侯紅乾, 冀建華, 劉益仁, 等, 2018: 緩/控釋肥对双季稻產量、氮素吸收和平衡的影響, *土壤*, 50(1): 43-50
- 5 巨晓棠, 谷保静, 2014: 我国農田氮肥施用現状、問題及趨勢, *植物营养与肥料学报*, 20(4): 783-795
- 6 李玲, 段英華, 徐明崗, 等, 2016: 河北省不同利用方式農田土壤氮磷環境風險分析, *中国農業資源与区劃*, 37(7):96-100, 149.
- 7 劉欽普, 2014: 中国化肥投入区域差異及環境風險分析, *中国農業科学*, 47(18):3596-3605
- 8 劉欽普, 2017: 中国化肥面源污染環境風險时空变化, *農業環境科学学报*, 36(7):1247-1253
- 9 盧艷麗, 自由路, 王磊, 等, 2011: 華北小麦-玉米輪作区緩控釋肥応用効果分析, *植物营养与肥料学报*, 17(1):209-215
- 10 陆文聡, 劉聡, 2017: 化肥污染对粮食作物生產的環境懲罰効応, *中国環境科学*, 37(5) : 1988-1994
- 11 王素英, 陶光燦, 謝光輝, 等, 2003: 我国微生物肥料的応用研究進展, *中国農業大学学报*, 8(1):14-18
- 12 徐明崗, 張文菊, 黄紹敏, 等, 2015: 中国土壤肥力演变 (第二版), 北京: 中国農業科学技术出版社
- 13 張德奇, 季書勤, 王芳芳, 等, 2010: 緩/控釋肥的研究応用現状及展望, *耕作与栽培*, 3:46-49
- 14 張福鎖, 王激清, 張衛峰, 等, 2008: 中国主要粮食作物肥料利用率現状与提高途径, *土壤学报*, 45 (5) : 915-924

- 15 張瑞福, 顏春榮, 張楠, 等, 2013: 微生物肥料研究及其在耕地質量提昇中的応用前景, 中国農業科技導報, 15(5):8-16
- 16 張淑香, 張文菊, 瀋仁芳, 等, 2015: 我国典型農田長期施肥土壤肥力变化与研究展望, 植物栄養与肥料学報, 21(6): 1389 -1393
- 17 趙秉強, 張福鎖, 廖宗文, 等, 2004: 我国新型肥料發展戰略研究, 植物栄養与肥料学報, 10(5): 536-545.
- 18 周建斌, 2017: 作物栄養从有机肥到化肥的变化与反思, 植物栄養与肥料学報, 23(6): 1686-1693
- 19 朱兆良, 2000: 農田中氮肥的損失与对策, 土壤与環境. 9(1): 1-6
- 20 朱兆良, 金继运, 2013: 保障我国粮食安全的肥料問題, 植物栄養与肥料学報, 19(2):259-273