

食料生産効率と環境改善のための

総合的な窒素資源管理のシミュレーション分析

金 彬 筑波大学
沈 志宏 国際農林水産業研究センター
氷鮑 揚四郎 筑波大学

本研究では中国食料生産効率と環境改善のための統合的な窒素資源管理戦略を模索することを目的とする。研究のアプローチでは物質フローと社会経済活動を統合的に記述・分析する。食料生産効率、窒素循環の度合い及び環境影響の指標の分析によって最善策を明らかにした。

Simulation analysis of integrated nitrogen management strategies to improve food production efficiency and environment

Bin JIN University of Tsukuba

Zhihong SHEN JIRCAS

Yoshiro HIGANO University of Tsukuba

The purpose of this is to explore a nitrogen resource management strategy on improving food production efficiency and environment in China. The approach of this study describes and analyzes relationship integrity between material flow and social-economic activities. We clarified a best plan by comprehensive analysis to the indexes as food production efficiency, the nitrogen cycle ratio and the environmental impact.

食料生産効率と環境改善のための

総合的な窒素資源管理のシミュレーション分析

金 彬 筑波大学
沈 志宏* 国際農林水産業研究センター
氷 鮑 揚四郎 筑波大学

1. はじめ

中国は世界の7.9%の耕地と6.5%の淡水資源で世界の20%近くを占める人口を養うために、大幅な単収の増加が実現したが、過剰な窒素肥料の利用により、余剰窒素の地下水、河川、大気への排出、富栄養化、温室効果ガスの発生などの環境問題が引き起こされている。今後、中国経済の成長と都市化の進展に伴い、家庭の食料消費構造が激変になっていくことが予測されている。一方、肉類の豚肉、牛肉、鶏肉の消費増に伴い、畜産系の窒素排出量は、製造業を超え、主要な排出源と指摘された。飼料用糧食を確保するためには、穀類の生産の拡大が不可欠である。将来的中国の食料安全生産と環境保護のためには、食料生産・消費に伴う窒素循環の形態、バイオマス利用効率を把握することが重要な意味がある。また、温室効果ガスの削減等の環境改善、エネルギー自給率の向上、水質改善、土壌の改良、価格肥料・化石燃料調達に伴う資金流出の抑制、雇用の創出、地域の活性化、非常時のエネルギーの確保のためには効率的な窒素資源管理は緊急な課題である。

1.1 中国環境規制の動向

大気汚染：第12次5カ年計画(2011~2015年)からは、窒素酸化物(NO_x)が総量規制の対象となった。火力発電所、製造業(セメント工場、製鉄所)といった主要排出源や移動発生源に対する規制強化の動きが始まっている。すでに、「火力発電所排煙脱硝工程技術規範(SNCR)」が2010年4月1日に正式に施行されている。

水質汚濁・地下水汚染：農地灌漑水、漁業水質、汚水、地下水品質基準などの環境基準が整備されているほか、「水污染防治法」が2008年に改正され、重点汚染物質の排出総量規制制度が導入された。さらに「全国地下水污染防治対策計画」「長江中下流域水污染防治対策計画(2011-2015年)」が発表された。

土壌汚染：潜在的な問題が指摘されていることから、今後、「土壌污染防治法(草案)」等の法整備が進められると考えられる。法の執行体制については、近年、強化が図られており、2008年に環境保護総局が環境保護部に格上げされるとともに、地方保護主義による弊害に対抗するため、6つの区域環境保護督查センターが設立されている。

1.2 研究対象地域

(1) 資源

松原市は、自然の資源が豊富で、地上には黄金とうもろこしが実り、地下には「黒い金」の石油が埋蔵し、中国の「穀物の倉、肉の庫、漁の里」、「石油の海」と言われる。世界で重要なトウモロコシ生産地帯で、中国の食料の生産基地である。農産物資源については、全市で約 100 万 ha の耕地があり、全国の商品穀物基地に指定されている。2008 年から穀類生産量は 725 万トンの水準に達し、吉林省の 25%を占める。そのうち、トウモロコシの生産量は 527 万トン、吉林省で最も多い地域の一つである。

松原市は科尔沁草原の東端に位置し、全市の草原面積が 53 万 ha で、タンパク質の含有率が高く、良質な牧草（乾草）資源が 40 トン余り、天然な牧場である。豊かな草原資源は松原市の畜産業の高度成長の保障である。2011 年養殖業は養豚が 745 万頭、牛が 146 万頭、羊が 523 万頭、家禽類が 1.4 億羽の生産水準を達成した。養殖業を起因した廃棄物は標準石炭換算で約 1,3000 トンに相当する。

食料生産基地として、農業バイオマス資源の賦存量が約 1,000 万トンと試算される。農業バイオマス資源の組成は豊かなセルロース、ヘミセルロース、木質素で、バイオ発電、飼料などの最適な原料である。

(2) 地理と環境

松原市は吉林省、黒竜江省、内モンゴル自治区が交わる位置にあたり、東北三省と内蒙古自治区の 8 市 14 県の交通中枢で物流センターとも言われる。将来的には中国東北地域核心都市となり、周辺の 3,100 万の人々に重要な役目を発揮する。気候変動によって、降雨量が経年減少傾向にある一方、人口増加、農業・畜産業の生産消費などを起因した水質汚濁物質は河川、湖の水質に大きな影響を与えることが予測されている（2010 年、都市排水量は 4782.81 万トン、工業排水が 15.71%で標準排水の達成率が 87.6%、生活排水が 84.3%である）。また、農業、畜産業、製造業、サービス産業及び静脈産業の活動量の拡大によって、エネルギー、化学肥料の生産消費の拡大が予想されている。それらの経済社会的な要因の産業、生活からの排ガスによる大気環境（PM）、地球温暖化（GHG）への影響が増々拡大の傾向が予測されている（大気質は 0.069mg/m³ でレベル 2 の 0.040/m³ よりも低レベル、県、鎮はレベル 3 より低いことである）。

2. 研究目的と手法

本研究では、中国松原市の農業・畜産業を例として、窒素循環の形態を把握し、窒素利用効率強化のためのバイオマス利活用の方策を模索する。中国国内の関連研究は水環境と地球温暖化の緩和のための総合的なアプローチと定量的評価が少ない。氷鮑、水野谷¹⁾、沈ら²⁾は水環境と地球温暖化の緩和のための環境修復技術、養豚業廃棄物のエネルギーへの変換、農業バイオマスの再生利用及び経済政策評価を中心として研究がある。小林、氷鮑、水野谷³⁾は日本を対象としてバイオマス資源の定式化、検証を行った。沈ら⁴⁾は窒素循環の

視点から中国食料需給及び一連の経済活動を起因した環境強度の変動の中長期予測分析を行った。本研究で取扱う手法は大きく 2 種類に分けられ、それぞれはライフサイクル環境分析、社会環境経済システムのシミュレーション分析である。ライフサイクル環境分析・評価は製品や技術の環境特性を知るためには、生産、消費、廃棄というライフサイクル全体を分析する方法が有効である。本研究では、ライフサイクル環境分析に関する手法やデータベースの開発、そして、それらに基づいた具体的な食料、エネルギー、水資源の生産消費及びエネルギー変換技術の評価を実施する。社会環境経済システムのシミュレーション分析とは窒素循環の視点から環境特性に加えて経済社会的な要件を考慮した統合的な分析・評価である。良い環境特性を持つ技術や政策であっても社会経済の形態を無視してはいけない。また、発展途上国において、スムーズに推進するためには経済発展や雇用確保などは決定要素となる。本研究では、産業連関分析法や線形計画法などを用いて、技術の環境側面だけでなく経済・社会側面も考慮した統合的な窒素資源管理政策をデザインし、評価を行う。

3. シミュレーションモデルの構造と定式化

本研究では食料チェーンの窒素の流れ、環境への影響及び窒素資源管理の環境的、経済的な効果を把握するため、経済学、社会環境システム工学、物質均衡原理、産業連関理論に基づき、総合的な窒素資源管理システムモデルを構築した。このモデルは窒素循環モデル、社会経済システムモデル、評価指標、目的関数、政策関数及び制約条件から構成されている。物質循環モデルは地域生産消費の社会経済活動を起因とした窒素バランスを記述する。社会経済システムモデルは産業連関モデルを活用し、生産者、消費者及び政府の行動を記述し、すべての生産は需要を満たすことが大前提である。4つのシミュレーションのシナリオに基づいて、社会経済活動から排出される窒素量を操作変数し、その制約条件の下に GDP の最大化を目的関数とした最適化問題をシミュレーションにより解いた。評価指標に基づき、循環型社会を見据えた窒素循環のあり方に最適な政策とその効果を明らかにした。主要なモデル式は以下の通りになる。

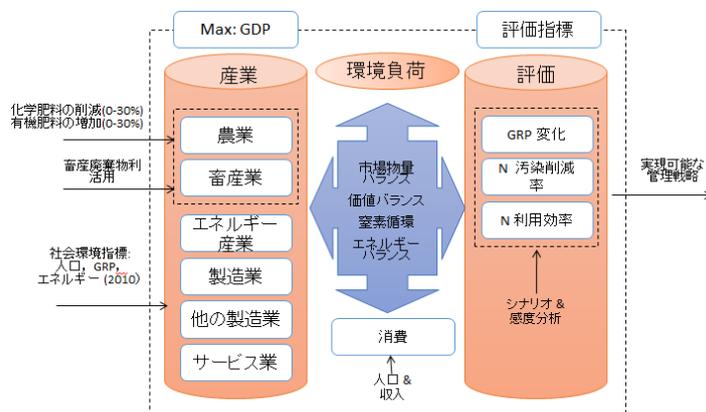


図 1 シミュレーションモデルの構造

3.1 主要モデル方程式

窒素バランス

$$\text{Input_N}_{(t)} = \text{Output_N}_{(t)}$$

(N 投入量=N 排出量)

有機資源の発生量

$$\text{OR_P}_{(i,j,t)} = \text{rate_P}_{(i,j)} * \text{SEA}_{(i,j,t)}$$

(有機資源発生量=発生率×社会経済活動量)

潜在的な有機資源収集量

$$\text{OR_C}_{(i,t)} = \sum_{j=1}^j \text{OR_P}_{(i,j,t)} * \text{rate_C}_{(i,j,t)}$$

(有機資源収集量=有機資源発生量×可能な回収率)

i=1:農業有機資源

i=2:畜産業有機資源

i=3:生活生ごみ資源

j:品目

農業有効な窒素利用量

$$\text{EU_N}_{(t)} = \sum_{f=1}^f \text{EU_N}_{(f,t)}$$

(農業生産に必要な有効利用量=多種肥料の有効利用量の合計。f=1 化学肥料, f=2 農業廃棄物堆肥, f=3 畜糞尿堆肥, f=4 人糞尿堆肥, f=5 生ごみ堆肥)

有機肥料の有効利用量

$$\text{EU_N}_{(f,t)} = \text{FR_C}_{(f)} * \text{rate_A}_{(f,j)}$$

(有機肥料の有効利用量=有機資源収集量×吸収率)

物質均衡

$$\text{rate_A}_{(f,j)} + \text{rate_CL}_{(f,j)} + \text{rate_UF}_{(f,j)} + \text{rate_AN}_{(f,j)} + \text{rate_F}_{(f,j)} + \text{rate_L}_{(f,j)} + \text{rate_I}_{(f,j)} = 1$$

(吸収率+収集揮発割合+流失率+反硝化割合+未利用流失率+埋立割合+ 焼却割合=1)

通常財のフロー条件式

$$X_{(i,t)} \geq \sum_{j=1}^5 A_{ij} X_{(j,t)} + C_{(i,t)} + G_{(i,t)} + I_{(i,t)} + E_{(i,t)} - M_{(i,t)}$$

$X_{(i,t)}$: 通常財産生産額 (内生)

A_{ij} : 通常財産の投入係数マトリックス (外生)

$C_{(i,t)}$: 通常財の民間消費 (内生)
 $G_{(i,t)}$: 通常財の政府消費 (内生)
 $I_{(i,t)}$: 通常財産業の投資額 (内生)
 $E_{(i,t)}$: 通常財の移出輸出 (内生)
 $M_{(i,t)}$: 通常財の移入輸入 (内生)

価値バランス

$$P_i \tilde{X}_i = \sum_{j=1}^5 P_j A_{ij} \tilde{X}_j + v_i \tilde{X}_i$$

P_i : 通常財価格率 (内生)

\tilde{X}_i : 通常財産業生産額 X_i を対角した行列 (内生)

v_i : 通常財産業の付加価値率(外生)

付加価値率

$$v_i = \sigma 1_i + \sigma 2_i + \sigma 3_i + \sigma 4_i$$

$\sigma 1_i$: 通常財産業の雇用者可処分所得割引率(外生)

$\sigma 2_i$: 通常財産業の営業利益割引率(外生)

$\sigma 3_i$: 通常財産業の減価償却率(外生)

$\sigma 4_i$: 通常財産業の税率(外生)

目的関数

$$Max = GRP$$

$$GRP = \sum_{i=1}^5 v_i X_i$$

シミュレーションのシナリオ:

Case0: 対策なし

Case1: 化学肥料使用の制御

Case2: 農業有機廃棄物を有機肥料としての利活用

Case3: バイオマス資源の統合管理

Case4: バイオマス資源のエネルギー変換技術の導入

4.結果と検討

効率的な窒素資源管理は農村経済の活性化への貢献だけではなく、生産効率の改善効果がある。主要な分析結果は以下の通りである。

化学肥料の使用量の減少 (Case 1) による農業窒素排出量の低減効果が著しい。しかし、化学肥料削減率が 2%を超えた場合、GRP が 5 億元以上のマイナス効果になることが明らかになった。化学肥料施用量の減少は製造業を含む関連産業への影響があることが明らか

になった。Case 1 の収益分岐点は化学肥料の 2%減であることが明らかになった。

有機農業の拡大(case 2)は農・畜産業・生活などの有機廃棄物の循環利用を促進することによって 3.6%化学肥料を代替することが可能であることが明らかになった。有機農業の普及効果の感度分析によると、普及率が最大 6.6%である。5%より多く有機農業の普及によって、Case 1 と同じく、経済面に 13.41 億円のマイナス効果が明らかになった。化学肥料の代替によって経済活動を起因した環境影響要因の窒素の排出が抑えられる。社会的な生産効率は 5%を強化できることが明らかになった。

Case3 は有機廃棄物の知能的管理のため多次元の肥料の総合的管理を最適化することによる食料チェーン発想である。シミュレーション結果によると、社会活動による環境影響物質 N の削減率が 3%より一層削減する場合、経済面へのマイナス効果が見られた。

Case 4 はバイオマス資源管理の強化のためのエネルギー変換技術の導入の効果を検証した。シミュレーション結果によると、エネルギー変換技術 B への 5,000 万元投資は、電力供給規模 10,000KWh/年、500 万元/年の付加価値を創出できることがあきらかになった。2010 年の全市の経済水準を維持する前提条件に基づいて、地域窒素排出量は 2010 年排出水準と比べ 3-4%削減は適切であることが明らかになった。また地域全体の生産効率 3%を増加することも明らかになった。

5. 結論

化学肥料低減のみの実施は環境面に効果的であるが、経済面には限界がある。化学肥料の代替によって経済活動を起因した環境影響要因の窒素の排出が抑えられる。化学肥料の削減政策と同様に経済面に限界がある。有機肥料と化学肥料の統合管理によって適切な削減率は 3%であることが明らかになった。バイオマス資源管理の強化のためにエネルギー変換技術の導入が期待されている。

参考文献

1. Higano, Y., Mizunoya, T., and Kobayashi, S. (2009) A Study on Synthetic Regional Environmental Policies for Utilizing Biomass Resources, *International Journal of Environmental Technology and Management*. Vol.11(1/2/3),102-117.
2. Shen, Z., An, L., & Higano, Y. (2012) Application Feasibility of Environmental Purification Technology and Financial Policies in Rural Areas Taihu Economic Circle China, *Japan Association for Human and Environmental Symbiosis*, Vol.20, 34-43.
3. 小林慎太郎, 櫻井一宏, 水野谷剛, 氷鮑揚四郎. (2006) 霞ヶ浦流域におけるバイオマス資源利用方策の検討, *地域学研究*, Vol.35(4), 1-17.
4. Shen, Z., Kusano, E., Chien, H., and Koyama, O. (2014) Predictive Analysis of Nitrogen Balances Resulting from the Production and Consumption of Livestock Products in the Huang-Huai-Hai Region, China, *Japan Agricultural Research Quarterly*, Vol.48(3), 331-342.