

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 19 日現在

機関番号：82711

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25340122

研究課題名(和文)人間活動が都市生態系の窒素循環に与える影響の診断手法の開発と予防的治療策の探求

研究課題名(英文)Diagnosis and preventive treatment of impacts of human activities on nitrogen balance of urban ecosystem

研究代表者

劉 晨 (Chen, LIU)

公益財団法人地球環境戦略研究機関・その他部局等・研究員

研究者番号：70425495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、急速な成長下にある中国大都市を代表的な都市生態システムの例に取り上げ、自然科学的手法と社会科学的手法の融合により、急速な都市化に伴う人々の生活スタイル(食生活、家庭衛生設備、交通手段)及び生産スタイル(農業、工業、サービス業)の変化がどれほど地域窒素収支や水環境に影響を及ぼしているかを定量的に解明した。また、物質循環の視点から地域環境問題や持続性の診断・予防的治療を行った。大都市のみを観察した場合には河川への潜在窒素負荷量は近年減少傾向にあり、水質汚染問題は改善されているように見えるが、周辺地域を含む広範囲で考えると問題はむしろ拡大していると言え、新たな環境対策の提案が急務である。

研究成果の概要(英文)：The objectives of this study are to diagnose and prevent environmental problems that threaten urban sustainability, the impact of changes in lifestyle (diet, domestic sanitation, and motorization), and production style (agriculture, industry, and services) with the rapid urbanization on regional nitrogen (N) flows, and the water environment was quantitatively evaluated. The mega-city Shanghai and Peking in China was chosen as a case study to investigate the temporal changes in nitrogen flow during 1980 and 2008 by a multidisciplinary approach (a field survey, a regional nitrogen mass balance model, input-output analysis, etc.). Although the total potential of nitrogen load and water pollution problems seem to have improved, the problem has shifted and expanded to affect a wider area through the food/product chain and water/air movement. Further effective solutions that aim at material cycles are necessary and have to be implemented on a large scale.

研究分野：環境学

キーワード：都市化 窒素収支 水環境 生活・生産スタイル 中国大都市

## 1. 研究開始当初の背景

都市化とは、人口が都市部に集中する過程であり、人々の生産と生活様式が農村型から都市型へと変化する歴史的な過程でもある。都市化は人類の進歩において必然的に通過する過程であるが、その過程では地域の窒素などの物質循環のバランスを崩し、環境資源に大きな影響を与えている。例えば、都市で肥料として使われていた排泄物は水洗トイレの普及により下水道へ流される。下水処理施設の未整備や処理能力不足のため、大部分の生活用水は処理しきれずに直接河川へ放出されている。肉類などの蛋白質の摂取量の増加で都市生活者の排泄物に多く含まれるようになった窒素は、河川・湖沼・海洋の富栄養化を引き起こす原因となる。また、都市生活者の収入増とともに車の台数が増える。車から排出される NO<sub>x</sub> は大気汚染や酸性雨に繋がり、また、大気沈降により陸域の窒素負荷源となる。さらに、地域が都市化された際には、多くの植生や表土は道路・駐車場・歩道などのような不浸透性の表面で置き換えられるので、雨に含まれている窒素や、屋根、道路、地表に蓄積された窒素は排水路、下水道（雨水の排出）や地下水を通して、最終的には河川、湖沼、貯水池、海に流される。したがって、都市型生活や生産スタイルの変化が地域の窒素などの物質循環のバランスを崩し、富栄養化、貧酸素水塊、酸性雨、大気汚染、地球温暖化、オゾン破壊、健康影響、食糧安全、生態系サービスの低下、生物多様性の低下などを引き起こすと考えられる。

2009年に発行された科学誌「ネイチャー」において、世界28カ国の科学者は、気候変動などの環境への脅威に対応するため、地球に生物物理学上の安全限界を9つ設けることを提案した。この論文によると、これらのうち、3つ（気候変動、生物学的多様性、生物圏への窒素・リンの投入）については既にその設定値を超えており、特に生物圏への窒素投入については70年代前半に安全限界（35TgN/年）を超えて、現在はその4倍以上にも達している。また、これらの要素は互いに緊密に結びついており、一つが安全限界を超えると、その他の要素も安全限界にとどめられなくなる恐れがあると報告された（Rockstrom et al. 2009）。共著者の一人であるミネソタ大学環境研究所長のジョナサン・フォーリー教授は今後の研究では、これらの安全限界内で社会が安全・正常に、かつ持続的に発展できる道を模索すべきであると述べた。

著者らは、これまで中国農村地域を主なフィールドとして、継続的に中国にある典型的農業生態系について現地調査を実施し、主に食生活や農作や人間排泄物の排出ルートなどの人間活動とその変化が農業生態系の

水・窒素循環に及ぼす影響を定量的に解明してきた（Liu et al. 2008; 2009; 2012）。これらの研究により、農業生態系における生活・農業生産スタイルおよびその変化が地域負荷構造の変化に与える影響を定量的に評価する方法論が確立された。本研究は、これまで確立した方法論を都市生態系に発展させるものである。

## 2. 研究の目的

本研究は急速な成長下にある中国大都市（上海市および北京市）を代表的な都市生態システムの例に取り上げ、自然科学的手法と社会科学的手法の融合により、急速な都市化に伴う人々の生活スタイル（食生活、家庭衛生設備、交通手段）及び生産スタイル（農業、工業、サービス業）の変化がどれほど地域の窒素循環や水環境に影響を及ぼしているかを定量的に解明する。それとともに、物質循環の視点から地域環境問題や持続性の診断・予防的治療を行い、環境共生型/循環型都市システムに向けて改善策、緩和策、適応策の提案を行うことを目的とした。

## 3. 研究の方法

主な研究手法と内容は以下の通りである。

(1) 都市生態系の物質循環は外部に依存度が高く、システム内の循環が少ないため、地域窒素収支モデルの改良を行った。

(2) 代表地域における一般住民を対象にアンケート調査と聞き取り調査を実施し、生活スタイル（食生活、家庭衛生設備、交通手段など）の現状や変化を明らかにするとともに、その変化の要因分析を行った。

(3) 産業連関表や環境統計年鑑を用いて、生産スタイルの変化が地域窒素負荷構造の変化に与える影響を明らかにした。

(4) 窒素のソースとシンクの時系列変化を分析するため、1980-2010年の各年の人口、各産業の生産量・生産額、家庭消費などの統計データ、大気観測データ、産業連関表、住民日常生活調査を元に、代表地域における窒素収支に関するデータベースを構築した。

(5) 都市生態系窒素収支モデルに関わる諸パラメータ（産業毎の窒素排出強度、1人あたりの窒素摂取量/排出量、人間排泄物の排出ルートなど）の同定を行った。

(6) 生活スタイルと生産スタイルの変化が地域窒素収支に与える影響を定量的に評価した。

(7) 物質循環の視点から地域環境問題や持続性の診断を行い、予防的治療策を提言した。

## 4. 研究成果

研究期間内に主に以下の研究成果が挙げられた。

(1) 1980年から2008年までの10年毎の農業・工業・生活などの人間活動による上海水域への陸域からの潜在窒素負荷量を図1に示す。その特性は、次のように要約できる。

①人為的反応窒素（すなわち、化学肥料、大気沈降、生物による窒素固定および移入飼料と食糧）の平均合計投入は、1980年の $3.28 \times 10^5$  t-Nから、1990年には $3.48 \times 10^5$  t-Nに、2000年には $3.68 \times 10^5$  t-Nに増加したが、2008年には $3.23 \times 10^5$  t-Nに減少した。化学肥料窒素は、窒素負荷の最大要因であったが、1980年には $2.04 \times 10^5$  t-Nに、1990年には $1.98 \times 10^5$  t-Nに、2000年には $1.62 \times 10^5$  t-Nに、そして2008年に $1.10 \times 10^5$  t-Nに減少した。その一方で、大気沈降による窒素投入量は、1980年の $3.98 \times 10^4$  t-Nから、1990年には $4.97 \times 10^4$  t-Nに、2000年には $8.95 \times 10^4$  t-Nに、2008年には $9.94 \times 10^4$  t-Nに増加している。大気沈降量の増加は自動車の使用の増加によるものと考えられているのに対し、化学肥料窒素の減少の主な要因は都市面積の拡大による農地面積・農業生産の縮小によるものである。

②水域への窒素負荷総量は2000年当りにピークに至り、その後減少傾向にある。そのうち、土地からの窒素流出量は総量の約4~5割、工業・サービス業は1~2割、家庭排水は1~2割を占めている。

③農地からの窒素流出量が減少した反面、都市部から地面や河川のコンクリートなど人工物被覆によって水域への窒素流出量が増加した。農地からの窒素流出量の土地から窒素流出総量に占める割合は1990年の74%から2000年の64%、2008年の43%まで減少した。一方、都市部からの窒素流出量は1990年の26%から2008年の57%まで増加した。

④工業・サービス業（特に紙と紙製品の製造業）からの排水による窒素は1997年の $2.11 \times 10^5$  t-Nから、2002年には $6.95 \times 10^4$  t-Nに、2007年には $5.39 \times 10^4$  t-Nへと劇的に減少した。その減少は前述したように製造業からサービス業への産業の構造的変化、工場排水処理技術の改良および工場の外部への移転によるものである。ただ、サービス業からの排水や窒素負荷量が増加する傾向にある。

⑤食料需給については1980年には肉や水産品などの生産量が消費量を上回り、域外へ移出されていたが、90年代から域外から移入する事態になった。飼料や食物の移入は上海で消費される窒素は他の地域に依存していることを意味している。

⑥急速な人口増加と生活水準向上によって、家庭排水からの窒素負荷量が増加しているが、2000年以降は排水処理率や処理能力の向上により水域への窒素負荷量が減少している。

⑦養殖漁業も一つの大きな窒素負荷源であり、水域への窒素負荷総量の約2割前後を占めている。

(2) 日常食生活の調査結果によると、上海市でも北京市でも、急速な都市化により、食生活は従来の穀物を中心とするものから、副食や動物性蛋白食品などが増加し、食生活の「多様化」、「西洋化」、「高級化」、「簡便化」、「外部化」が進み、量的にも質的にも大きく変化したことが明らかとなった。これらの変化に伴って、食品廃棄物の量も急増している。

(3) 上海や北京などの大都市では産業構造の変化により、「工業汚染」から人口集中・大量消費に基づいた「都市型汚染」へ変化している。下水処理施設にて調査した結果では、窒素の除去率が50-70%、リンの除去率が70-80%となっており、中国国内では高い水準だが、富栄養化の防止には更なる改善が不可欠である。

(4) 現地調査によると、一部の汚染の深刻な工業（製紙業、化学工業など）は賃金高騰や大都市での汚染源抑制政策や産業構造変化などの影響を受け、大都市から周辺の中小都市、農村または海外へ移転している。また第二次産業のみではなく、食料生産も地元で生産せず、域外から移入する状況へと変化しつつある。例えば、窒素負荷量の多い家畜飼養のほとんどは、他地域へ移転される傾向にある。このことから、窒素の負荷が大都市から中小都市、農村へ移転する「汚染転移」が発生していると考えられる。さらに、長江における流量や水質の長期変動は、夏季の東シナ海大陸棚域における表層塩分の低下、表層低塩分水中のDIN（溶解性無機態窒素）濃度の上昇に影響しているという研究報告もある。つまり、都市部の窒素負荷問題はローカルな環境問題に留まらず、水や大気循環によってグローバルな環境問題に拡大し、海洋生態系や森林生態系、土壌生態系など広範囲に影響を及ぼす可能性がある。したがって、大都市だけを観察した場合には、一見水質汚染問題は改善されているように見えるが、周辺地域や他の生態系を含む広範囲で考えると問題はむしろ拡大していると言える。

(5) 以上の解析結果に基づく、この地域の新たな環境対策としては、①他地域・他生態系への窒素負荷移転を防止するための総合型流域管理、②都市中心地域の点源汚染について、下水処理に窒素・リンの高度除去処理技術の導入、③農地からの面源汚染については過剰化学肥料農業からの脱出、および食品廃棄物などの3R (Reduce, recycle, reuse) に基づく「循環型社会」の形成、④市民参加による低窒素負荷社会の形成、トップダウンだけでなくボトムアップの政策立案と市民参加型の実践を行う、⑤市民への正しい情報の伝達および環境教育の普及、⑥国際的枠組みへの参加、例えば、東シナ海の水質汚濁問題の解決など、周辺諸国との連携、などが必要と考えられる。

<引用文献>

- ① Rockstrom J, Steffen W, Noone K et al. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature* 461:472-76.
- ② Chen LIU, Qinxue WANG, Kelin WANG, Yonghui YANG, Zhu OUYANG, Yaoming LIN, Yan LI, Alin LEI and Tetsuzo YASUNARI. Recent Trends and Problems of Nitrogen Flow in Agro-Ecosystems of China, *Journal of the Science of Food and Agriculture* 92(5), 1046-1053, 2012.
- ③ Chen LIU, Qinxue WANG, Alin LEI, Yonghui YANG, Zhu OUYANG, Yaoming LIN, Yan LI, Kelin WANG. Identification of anthropogenic parameters for a regional nitrogen balance model via field investigation of six ecosystems in China. *Biogeochemistry* 94, 175-190, 2009.
- ④ Chen LIU, Qinxue WANG, Motoyuki MIZUOCHI, Kelin WANG, Yaoming LIN. Human Behavioral Impact on Nitrogen Flow - A Case Study in the Rural Areas of the Middle and Lower Reaches of Changjiang River, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 125, 84-92, 2008.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Chen LIU, Qinxue WANG, Chunjing ZOU, Yoshitsugu HAYASHI, and Tetsuzo YASUNARI. Recent trends in nitrogen flows with urbanization in the Shanghai megacity and the effects on the water environment. *Environmental Science and Pollution Research*, Volume 22(5), 3431-3440, 2015.
- ② 劉晨:上海市饮食生活对环境造成的氮磷潜在负荷量的估算。日本当代中国研究 2014, 168-182, 2014。(環境科学会誌 26(5)の中国語翻訳版)
- ③ 劉晨・林良嗣・安成哲三:上海市の都市化が地域窒素収支に及ぼす影響の解析と対策提案-社会経済要因を物質循環に結びつけて-, 環境科学会誌 27(5), 265-276, 2014.
- ④ Chen LIU, Tao HUANG. Recent Trends in Wastewater Flow and Pollutant Loads due to Urbanization in Shanghai. *Water Environment Research* 86(5), 433-444, 2014.
- ⑤ Chen LIU, Jinling FEI, Yoshitsugu HAYASHI, and Tetsuzo YASUNARI. Socioeconomic Driving Factors of Nitrogen Load from Food Consumption and Preventive Measures. *AMBIO* 43(5), 625-633, 2014.

- ⑥ Chen LIU, Chunjing ZOU, Qinxue WANG, Yoshitsugu HAYASHI, and Tetsuzo YASUNARI. Impact assessment of human diet changes with rapid urbanization on regional nitrogen and phosphorus flows -a case study of the megacity Shanghai. *Environmental Science and Pollution Research* 21(3), 1905-1914, 2014.

[学会発表] (計 3 件)

- ① Liu and Hotta (2016) Food waste generation and treatment in the food supply chain in Japan. Book of abstracts of the 3rd international scientific conference on material cycles and waste management (3RINCs) 488-491.
- ② 劉晨:都市化が地域窒素収支に及ぼす影響評価と対策提案, 環境科学会 2015 年会, 32, 2015 年 9 月 7-8 日.
- ③ 劉晨:北京市の都市化が地域窒素収支に及ぼす影響評価と循環型社会にむけた対策提案, 環境科学会 2014 年会, 71, 2014 年 9 月 18-19 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

劉 晨 (LIU Chen)

地球環境戦略研究機関/持続可能な消費と生産領域/研究員

研究者番号: 70425495

(2) 研究協力者

① 王勤学 (WANG Qinxue)

国立環境研究所/地域環境研究センター/主席研究員

② 林良嗣 (Yoshitsugu Hayashi)

名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター/センター長

③ 安成哲三 (Yasunari, Tetsuzo)

大学共同利用機関法人 人間文化研究機構 総合地球環境学研究所/所長

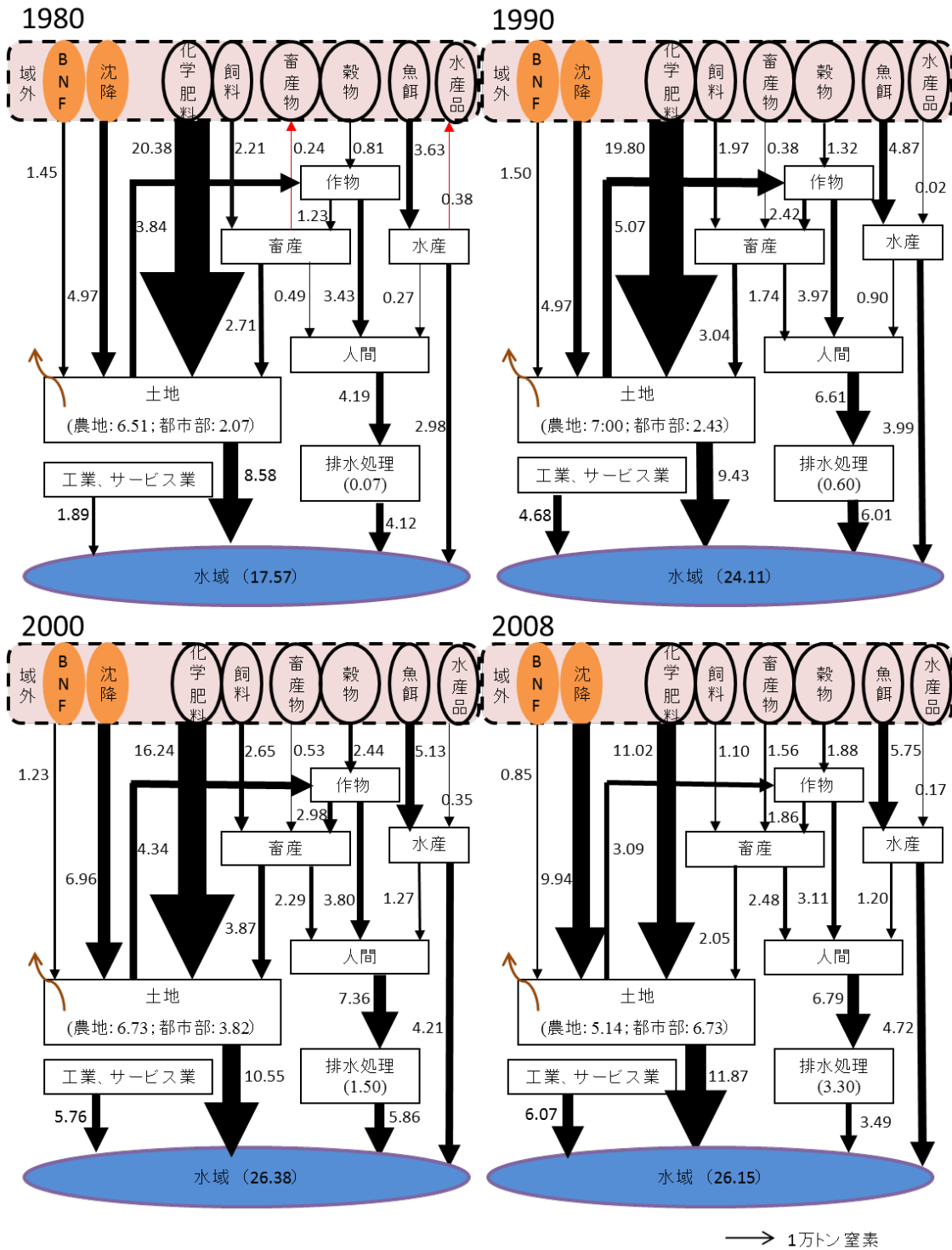


図1 1980-2008年における陸域窒素負荷構造の変化（上海市の例）