報 文

生物学的脱窒素反応の高能率化に関する研究(I)

——生化学反応のモデル化と動力学的取り扱い(その1)——

Studies on Biological Nitrogen Removal (I)
Modelling of Biochemical Reactions and Kinetics

村上 定暲*・石川 宗孝*・中西 弘*

ABSTRACT

The biochemical reactions were modelled and the system was treated kinetically for the nitrogen removal by activated process in which BOD oxidation, nitrification and denitrification proceed in parallel by the single sludge.

It was concluded from the results of the batch method that (1) organic carbon and ammonia nitrogen compete as an electron donor in the biochemical oxidation-reduction system, and (2) dissolved oxygen and nitrate (nitrite) nitrogen compete as an electron acceptor. The biochemical reactions for exogenous respiration, cell synthesis and endogenous respiration were modelled regarding each kind of bacteria group.

The kinetics were applied to the system, on the basis of the following reaction model : (1) the process consists of a complete homogeneous mixed liquor and is rate-determined by the biochemical reactions, (2) the reactions are apparently of the first order with respect to the substances which are taken in by the sludge activated for a specified reaction, and (3) the exogenous respirations are taken into account at first and the cell syntheses are treated as a correction term ; the endogenous respirations are negligible. The components, BOB, K_j -N, NO_x -N, DO and MLSS, of the mixed liquor calculated as a function of the time were found to be in good agreement with the experimental results of the batch method.

摘 要

有機物の酸化および硝化・脱窒に関する種々の細菌類が共存する活性汚泥法について、この混合微生物集団が行う各生物化学反応をモデル化し、反応槽内の各成分についての動力学的取り扱いを行った。

回分実験により、(1)有機炭素源およびアンモニア態窒素は生物学的酸化還元反応において、電子供与体として競争関係にあり、また、(2)溶存酸素および(亜)硝酸態窒素は電子受容体として競争関係にあることがわかった。

有機物の酸化、硝化および脱窒に関する微生物が行う外生呼吸、細胞合成および内生呼吸について、それぞれの生化学反応をモデル化した。槽内の各成分の速度式を、つぎに示す動力学的モデルに基づき導いた。(1)処理系は完全均一混合型であり、処理速度の律速は生化学反応であるとする。(2)生化学反応速度は、関与する物質および特定の反応に対して活性化された汚泥に関してそれぞれ見かけ上1次とする。(3)各微生物の行う反応は、外生呼吸をまず最初に考慮に入れ、つぎに細胞合成を補正項として扱い、内生呼吸は無視できる程度とする。

この速度式を用いて、反応槽内の各成分(BOD, K_j -N, NO_x -N, DOおよびMLSS)の濃度を時間の関数として計算し、回分実験値と比較したところ、よい一致が見られた。

* 山口大学工学部 Sadaaki MURAKAMI, Munetaka ISHIKAWA and Hiroshi NAKANISHI, Faculty of Engineering, Yamaguchi University

1. はじめに

湖沼や内湾における富栄養化問題は、昨今、一つの社会問題として衆目を集めている。生活排水などの有機物排水の生物処理において、従来の BOD 除去に加えて、窒素やリンの除去法も開発・実用化されており、今後の富栄養化防止には、これらの水処理の高度な技術開発が重要な鍵をにぎっている。一方、栄養塩類の除去技術に関する現在の大きな課題は、(1)省資源・省エネルギー型処理施設の開発、(2)処理施設のコンパクト化、(3)維持管理の簡素化等であろう。

生物学的窒素除去技術について見ると、活性汚泥法だけでも多種多様の方式が開発されている¹⁻³⁾。しかし、上記(1)~(3)の観点から考えると、まだ十分満足すべき方式は少ない。今日、特に注目されている方式は、1つの槽で BOD の酸化分解と硝化・脱窒を同時に行う方法(single-sludge single-reactor 法)である。この方法では、他の方法(single-sludge multi-reactor 法あるいは different-sludge separate-reactor 法)等と比較して、有機炭素源、pH 調整剤、曝気や循環ポンプの動力などの維持管理を大幅に節減できる。さらに既存の活性汚泥法による BOD 処理施設の若干の改良によっても本法を採用することが可能である。ところが、単一処理槽内において多種多様の微生物による種々の生化学反応が平行して同時に進行するため、設計・管理において不確定要素が生じやすい¹⁾。したがって、反応をスムーズに進行させ、安定した処理成績を得るためには、この生物処理系の機構解明とモデル化が望まれているが、余りにも影響する因子が多いので、まだ十分に解明されていない。

そこで、一連の本研究では、有機物の酸化および硝化・脱窒に関係する種々の細菌類の共存する系である活性汚泥法をいろいろな観点から検討し、本法の設計・操作に必要な知見を得ることを目的とした。今回は(1)この混合微生物集団が行う生化学反応をモデル化し、(2)これに基づく動力学的取り扱いを定式化する。つぎに、(3)このモデルを室内実験系に適用し、実際の処理系に拡張するための予備的検討を試みることにした。実験法としては、回分法を採用した。この方法は、連続法と比べて条件設定が容易で、さらに実験に要する時間が短縮できるため、今回の研究目的である生化学反応のモデル化と動力学的取扱いを検討するのに適している。

記 号

- a_i : 生物学的酸化還元反応において 1 電子移動当りの物質 i の消費量あるいは生成量(mg)
- k_j : 微生物の外生呼吸による反応速度定数($\text{meq}^{-1} \cdot \text{mg-MLSS}^{-1} \cdot \text{l}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)
- r_j : 微生物の外生呼吸による反応速度($\text{meq} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
- t : 時間(h)
- x_{ij} : 微生物が行う外生呼吸および細胞合成反応において共通に消費される特定の基質を選び、これが 1 meq 細胞合成反応に消費されたときの物質 i の消費量あるいは生成量(mg)
- 添字 i : 1—BOD, 2—DO, 3— NH_3 , 4— NO_x^- , 5—MLSS, 6— N_2 にそれぞれ対応する
- 添字 j : 1—BOD 酸化, 2—硝化, 3—脱窒の各反応にそれぞれ対応する
- α, β : 活性汚泥が電子供与体として、BOD あるいは NH_3 を消費するかの選択因子(α —BOD, β — NH_3 に対応し、 $\alpha + \beta = 1$)
- r, δ : 活性汚泥が電子受容体として、 O_2 あるいは NO_x^- を消費するかの選択因子(r — O_2 , δ — NO_x^- に対応し、 $r + \delta = 1$)
- θ, σ, τ : 外生呼吸に対する細胞合成による反応速度の比(θ —BOD 酸化, σ —硝化, τ —脱窒にそれぞれ関係する微生物に対応する)
- A_i : 反応槽内外からの単位時間における物質 i の流入あるいは流出量($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$)
- C_i : 物質 i の濃度($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
- C_{xj} : BOD 酸化, 硝化あるいは脱窒のそれぞれの反応に対して活性化された微生物の濃度($\text{mg-MLSS} \cdot \text{l}^{-1}$)

2. 実験方法

2.1 試料液

試料液の成分を表 1 に示す。有機物としてペプトンおよび肉エキスをを用い、また還元態窒素として NH_4Cl 、酸化態窒素としては NaNO_2 および KNO_3 を供給した。

2.2 供試汚泥

宇部市東区下水処理場の返送汚泥を 500μ のふるいで分け、水道水で 2~3 回洗浄したものを種汚泥とした。前回の研究⁴⁾に用いた plug-flow 型の 5 つの曝気槽からなる装置を使用して十分馴致し、酸化菌、硝化菌および脱窒菌が最もバランスよく共存していると思われる第 2 曝気槽の汚泥を供試汚泥とした。

表1 原水の組成

成分	濃度 (g/l)
Pepton	Variable
Meat Ex.	
NH ₄ Cl	
NaNO ₂	
KNO ₃	
K ₂ HPO ₄	0.14
KH ₂ PO ₄	0.11
H ₃ BO ₃	0.26
MgSO ₄ ・7H ₂ O	0.10

2.3 実験方法

MLSSが約5000mg/lとなるように供試汚泥を採り、10 lのガラスビンに入れて2～3回水洗した。つぎに、所定の成分の試料液を加えて全容を5 lとした。混合液を均一になるよう攪拌しながら、1 l/minの一定流量で曝気した。所定の時間に混合液を採取し、No.5Cのろ紙を用いてろ過した後、ろ液の成分を分析した。反応槽は30℃に設定された恒温槽に浸した。各物質の分析は前報⁵⁾と同じ方法によって行った。

3. 実験結果

本実験条件下では、硝化反応によって生じる酸化態窒素NO₂⁻およびNO₃⁻の存在比は反応中ほとんど一定(NO₂⁻-N:NO₃⁻-N=4:1)であったので、NO_x⁻として取り扱う(この理由は4.で述べる)。したがって、試料液へのNaNO₂およびKNO₃の添加量は、上記比率になるよう調整した。有機態窒素およびアンモニア態窒素はKj-Nで示す。なお、pHは6.5～7.0の範囲であった。本研究では、pHは反応中はほぼ一定として取り扱った。

初期値(ppm)として、BOD 726, Kj-N 717, NO_x⁻-N 82, MLSS 5980の条件下で、24時間反応させたときのBOD, Kj-N, NO_x⁻-NおよびDOについて、それぞれの経時変化を図-1に示す。BODについては、その初期値に対する比率、Kj-NおよびNO_x⁻-Nについては、全窒素量の初期値に対する比率で表わしてある。DOについては、実験温度(30℃)における飽和溶存酸素量に対する比率を示す。

図-1に見られるように、BODは反応開始とともにただちに減少し、15時間を経過すると90%以上が除去されている。有機物の酸化分解が著しい反応開始後5時間までは、曝気により供給された酸素は完全に消費さ

図-1 反応槽内の各成分の経時変化

プロット—測定値、実線—シュミレーション。

初期値C₀ (ppm) : BOD—726,

Kj-N—717, NO_x⁻-N—82, MLSS—5980。

れ、DOはほとんど存在しない。BODが70%以上除去される6時間以後、有機物の酸化分解に消費される酸素量に比べ、供給される量が相対的に多くなりDOは急激に増加しはじめ、10時間経過後DOは飽和状態となっている。

一方、Kj-Nは反応初期から酸化されて減少しているが、その速度は極めて遅い。2時間経過後、硝化速度は増加しはじめ、DOが急増する7時間前後において、その速度は最大を示す。このことは、(1)生物学的酸化還元反応における電子供与体としての有機態炭素および還元態窒素が競争関係にあり、炭素源が多量に存在する場合には電子供与体として有機物が優先的に消費されるためか、または(2)電子受容体としての溶存酸素が少ない場合には、還元態窒素の酸化速度が極めて遅いためか、あるいは(1)および(2)の両方の理由によるものであろう。

NO_x⁻については、反応開始とともにその濃度が急激に減少し、1時間経過後ではほとんど存在しない。6時間前後からNO_x⁻は少しずつ蓄積している。このことは、反応初期のDOが極めて低い場合には、硝化反応により生じたNO_x⁻はただちに還元されてN₂として除去されるためであろう(NO_x⁻が生物学的還元反応を受けると主としてN₂およびN₂Oを生成する⁶⁾。本実験条件下では、その大部分はN₂でN₂Oの生成量は極めて少ない。この詳細については、別に報告する予定である)。しかし、DOが増加してO₂による酸化的条件下では、Kj-Nの硝化速度が増大し、逆にNO_x⁻の還元速度が相対的に低下するため、NO_x⁻が少しずつ蓄積していることを示している。これらの事実より、本実験条件下での生物学的酸化還元反応では、電子受容体としてO₂およびNO_x⁻が競争関係にあることが予想される。

以上要約すると、DOが変化しはじめる6時間前後

を界にして、槽内の反応機構が著しく変化しており、生物学的酸化還元反応に与えるものとして溶存酸素量が極めて重要な因子であることを示している。そこでDOが急激に変化する6時間前後までの反応をさらに

詳しく調べるため、試料液中の各成分の初濃度を変えて、槽内で行われる生化学反応を検討した。代表的な実験結果を図-2のa~dに示す。

図-1の場合に NO_x^- -Nの初期値が82ppmであるのに対して、図-2のaは、 NO_x^- を無添加とし、他の成分についてはほぼ同程度の条件で実験を行った結果である。この条件下では、反応開始直後の NO_x^- の挙動(図-1では、 NO_x^- の濃度が急減している)を除いて、図-1で示す結果と全く同じような傾向を示している。

bについては、aの場合にBODの初期値396ppmに対して60ppmの低濃度とし、他の成分についてはほぼ同程度である条件での結果である。この条件では、有機物の酸化分解に消費される酸素量が少ないので、DOは反応初期から少しずつ増加している。さらに、 NO_x^- も反応開始直後より少しずつ増加している。aでは、電子供与体である有機物が多量に存在する上に、電子受容体として NO_x^- と競争関係にあるDOが少ないことから、 Kj-N の硝化により生じた NO_x^- は有機物や Kj-N に対する電子受容体として働き、ただちに還元されて N_2 として除去されているものと考えられる。逆に、bでは有機物が少ない上にDOが比較的多いために、 NO_x^- の還元速度が Kj-N の酸化速度よりも相対的に遅く、 NO_x^- が時間経過とともに蓄積されていることを示している。

cは、bの場合と同様にBODの初期値は低い、 NO_x^- の濃度が高い条件で行った結果である。bと比較して異なる点は、DOが反応初期から飽和状態で、BODの除去速度が極めて大きい。これは、BODが低く酸素消費量が少ないことに加えて、 NO_x^- 濃度が高く O_2 と同様に NO_x^- が電子受容体として有機物や Kj-N の還元作用に深く関与していることを示す。

dは、cと比較して、BODの初期値がさらに低い21ppmで、さらに NO_x^- -Nも15ppmと低く、 Kj-N のみが155ppmと高濃度の条件下での結果である。この場合の特徴は、 Kj-N の除去速度がa~cと比較して極めて高いことである。これは、電子受容体である O_2 の濃度が高いことに加えて、電子供与体として Kj-N と競争関係にあるBODが低いため、 Kj-N の酸化速度が相対的に高く、この上 Kj-N の酸化により生成・蓄積した NO_x^- が電子供与体として加わるため、 Kj-N の酸化がさらに加速されるためであろう。

以上の回分実験結果をまとめると、次のようになる。

1) BODが高いと、 O_2 の消費速度が大きく還元的条件となる。この条件では、 Kj-N の硝化速度に比べ

図-2 反応槽内の各成分の経時変化

プロット—測定値, 実線—シミュレーション

て、 NO_x^- の還元速度が相対的に高いため、硝化により生じた NO_x^- はただちに N_2 に還元される。

2) BODが低いと、 NH_3 の酸化速度が大きい。しかし、 O_2 による酸化的条件のため NO_x^- の還元速度が小さく、 NO_x^- が系内に蓄積する。

3) NO_x^- の濃度が高いと、BODの除去速度が大きくなり、 NO_x^- は O_2 の代りに電子受容体として働く。

これらの事実より、有機物および窒素化合物が共存する生物学的処理においては、次のような結論が得られる。

1) 有機物および還元態窒素は電子供与体として競争関係にある。

2) 酸化態窒素 NO_x^- と溶存酸素は電子受容体として競争関係にある。

4. 生化学反応のモデル化

本研究の処理方式は活性汚泥法とする。モデルで取り扱う微生物は、有機物酸化菌、硝化菌および脱窒菌のみとし、他の微生物が共存しても処理系には何ら影響を与えないものとする。つぎに、原水中の基質は、有機物、アンモニア態窒素および(亜)硝酸態窒素のみとし、リンや微量生化学関与物質は無関係塩類として取り扱う。窒素を含む有機化合物は酸化菌によって分

解され、アンモニアに変換されるので、有機態窒素はアンモニアとして取り扱う。本論文では、生化学反応に消費される物質はすべて基質と称し、一方生化学反応によって生成する物質はすべて代謝物とする。さらに、基質と代謝物を関係物質と定義する。

酸化菌、硝化菌A、Bおよび脱窒菌A、Bが共存する槽内に、有機物および NH_3 を投入すると、表2に示すような生化学反応が進行するものと考えられる。表2は、それぞれの微生物が行う外生呼吸(普通は呼吸であるが内生呼吸と区別するため定義する)、細胞合成および内生呼吸に対応する化学反応を図式化したものである。

表2に示す各生化学反応については、各菌の行う外生呼吸、細胞合成および内生呼吸に対応するそれぞれの反応が現実には区別されて独立に進行するという意味ではなく、あくまでも生化学反応をモデル化したものである。

表2に示すように各菌についての生化学反応を挙げると15種類に分類される。しかし、現実的な問題として、これらの反応をすべて考慮すると、生化学反応の取り扱いが極めて複雑となり、応用的な観点から望ましくない。したがって、本モデルでは次のように、簡略化する。

表2 生物処理における生化学反応の分類*

	外 生 呼 吸	細 胞 合 成	内 生 呼 吸
酸化菌	$\begin{array}{ccc} \text{Org.} & & \text{O}_2 \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_1 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$	$\begin{array}{ccc} \text{Org.} & & \text{O}_2 \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_1 + d\text{X}_1 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$	$\begin{array}{ccc} & & \text{O}_2 \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ & \text{X}_1 - d\text{X}_1 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{H}_2\text{O} \\ \text{NH}_3 & & \end{array}$
硝化菌A	$\begin{array}{ccc} \text{NH}_3 & & \text{O}_2 \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_2 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{NO}_2^- & & \text{H}^+ \\ & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$	$\begin{array}{ccc} \text{NH}_3 & & \text{O}_2 \\ \text{CO}_2 & & \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_2 + d\text{X}_2 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{NO}_2^- & & \text{H}^+ \\ & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$	$\begin{array}{ccc} & & \text{O}_2 \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ & \text{X}_2 - d\text{X}_2 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{NO}_2^- & & \text{H}^+ \\ \text{CO}_2 & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$
硝化菌B	$\begin{array}{ccc} & & \text{O}_2 \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ & \text{X}_3 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{NO}_2^- & & \text{NO}_3^- \end{array}$	$\begin{array}{ccc} \text{NH}_3, \text{NO}_2^- & & \text{O}_2 \\ \text{CO}_2 & & \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_3 + d\text{X}_3 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{NO}_3^- & & \text{H}^+ \\ & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$	$\begin{array}{ccc} & & \text{O}_2 \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ & \text{X}_3 - d\text{X}_3 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{NO}_3^- & & \text{H}^+ \\ \text{CO}_2 & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$
脱窒菌A	$\begin{array}{ccc} \text{Org.} & & \text{NO}_3^- \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_4 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{NO}_2^- \\ \text{H}_2\text{O} & & \end{array}$	$\begin{array}{ccc} \text{Org.} & & \text{NO}_3^- \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_4 + d\text{X}_4 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{OH}^- \\ \text{H}_2\text{O} & & \end{array}$	$\begin{array}{ccc} & & \text{NO}_3^- \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ & \text{X}_4 - d\text{X}_4 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{NO}_2^- \\ \text{H}_2\text{O} & & \end{array}$
脱窒菌B	$\begin{array}{ccc} \text{Org.} & & \text{NO}_2^- \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_5 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{N}_2 \\ \text{H}_2\text{O} & & \text{OH}^- \end{array}$	$\begin{array}{ccc} \text{Org.} & & \text{NO}_2^- \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_5 + d\text{X}_5 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{OH}^- \\ \text{H}_2\text{O} & & \end{array}$	$\begin{array}{ccc} & & \text{NO}_2^- \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ & \text{X}_5 - d\text{X}_5 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{N}_2 \\ \text{H}_2\text{O} & & \text{OH}^- \end{array}$

* 各物質の係数は省略した

図-3 反応槽内の NO_2^- と NO_3^- の濃度の経時変化
実験条件は図-1と同じ。

モデル(1)各菌についての生化学反応は、外生呼吸をまず最初に考慮し、細胞合成は補正的に取り扱う。さらに、内生呼吸については無視できる程度とする。

モデル(2)硝化および脱窒については、表2に示すようにAおよびBのタイプの細菌が存在し、 NO_2^- および NO_3^- が関係物質として反応に関与している。しかし、本モデルでは、硝化菌および脱窒菌は、それぞれ1種類とし、 NO_x^- ($2 < x < 3$)をそれぞれの関係物質とする。ここで、 x は次式で与えられる。

$$x = \frac{2C_{\text{NO}_2^- - \text{N}} + 3C_{\text{NO}_3^- - \text{N}}}{C_{\text{NO}_2^- - \text{N}} + C_{\text{NO}_3^- - \text{N}}} \quad (1)$$

この根拠として、本実験条件下では、 NO_2^- と NO_3^- の濃度比はほぼ一定に保たれていたからである。 NO_2^- および NO_3^- の濃度の経時変化の1例として、図-1に対応する実験結果を図-3に示す。このことを硝化菌について説明すると次のようになる。

NH_3 が汚泥フロック内の硝化菌Aにより NO_2^- に変換されると、 NO_2^- は同じ汚泥フロック内の硝化菌Bでただちに NO_3^- に変換される。もし、硝化菌AおよびBの処理速度〔(細菌量)×(代謝速度)〕が等しいか、あるいはB菌の速度の方が大きい場合には、 NH_3 はすべて NO_3^- に変換されるであろう。しかし、B菌による処理速度の方が遅い場合には、 NO_2^- の一部のみが NO_3^- に変換されるため、 NH_3 の代謝物として NO_2^- および NO_3^- が混在して汚泥フロックより排泄される。このとき、汚泥内の硝化菌AおよびBの存在比が常に一定であれば、処理系内の NO_2^- および NO_3^- の濃度比は一定に保たれることとなる。

モデル(3)酸化菌、硝化菌および脱窒菌の混合微生物集団、すなわち汚泥フロックを仮定上の単一生物体と見なし、各々の細菌はこの生物体内の1つの代謝組織とする。

このようなモデルに基づくと、各々の細菌を特に区別して取り扱う必要はない。どの型の生化学反応が進行するかどうかについては、外部環境すなわち、被処理液中の物質の組成比のみに依存することになる。これらの環境(または、選択)因子に関するパラメーターは5.2で定義する。

以上のことを要約すると、表2の生化学反応は、表3のように簡略化される。

(「5. 動力学的取り扱い」以後の第2回は次号掲載予定)

表3 生化学反応のモデル

型	外 生 呼 吸	細 胞 合 成	電 子 供 与 体	電 子 受 容 体
酸 化	$\begin{array}{ccc} \text{Org.}(a_1) & & \text{O}_2(a_2) \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_1 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$	$\begin{array}{ccc} \text{Org.}(x_{11}) & & \text{O}_2(x_{21}) \\ \text{NH}_3(x_{31}) & & \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_1 + \Delta \text{X}_1(x_{51}) & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$	Org.	O_2
硝 化	$\begin{array}{ccc} \text{NH}_3(a_3) & & \text{O}_2(a_2) \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_2 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{NO}_x^-(a_3) & & \text{H}^+ \\ & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$	$\begin{array}{ccc} \text{NH}_3(x_{32}) & & \text{O}_2(x_{22}) \\ \text{CO}_2 & & \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_2 + \Delta \text{X}_2(x_{52}) & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{NO}_x^-(x_{42}) & & \text{H}^+ \\ & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$	NH_3	O_2
脱 窒	$\begin{array}{ccc} \text{Org.}(a_1) & & \text{NO}_x^-(a_4) \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_3 & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{N}_2(a_4) \\ \text{H}_2\text{O} & & \text{OH}^- \end{array}$	$\begin{array}{ccc} \text{Org.}(x_{13}) & & \text{NO}_x^-(x_{43}) \\ & \searrow \quad \swarrow & \\ & \text{X}_3 + \Delta \text{X}_3(x_{53}) & \\ & \swarrow \quad \searrow & \\ \text{CO}_2 & & \text{OH}^- \\ & & \text{H}_2\text{O} \end{array}$	Org.	NO_x^-