

個別景観要素の生態的機能に着目した 流域圏単位的环境管理

安佛 かおり¹・戸田 祐嗣²・辻本 哲郎³

¹非会員 名古屋大学大学院工学研究科研究員 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: kanbutsu@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学大学院工学研究科准教授 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: ytoda@cc.nagoya-u.ac.jp

³正会員 名古屋大学大学院工学研究科教授 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: ttsujimoto@genv.nagoya-u.ac.jp

流域圏は、土地利用や地形により規定されるさまざまな景観要素から構成されている。また、これらの要素は、水や物質のフラックス網により相互につながっている。本研究では、流域圏におけるこの構造に注目し、各景観要素において生態的機能および生態系サービスが生み出される機構を、内的構造や外的因子と関係づけることにより特徴づけることを試みた。また、これらをもとに、人間活動が生態系に影響を与える仕組みを考察し、流域単位的环境管理の方向性を示した。とくに、各景観要素における、機能や構造、人為的な影響の固有性や共通性を明らかにすることにより、総合的な管理に結び付けることを目指した。

Key Words : river basin managements, assessment, ecological function, ecosystem service

1. はじめに

持続可能な国土管理を目指すとき、その一つの管理単位として、同一の湾に流入する流域の集まりである「流域圏」を想定し、自然がもつ物質循環機能を最大限に利用する「自然共生型」シナリオの下で流域環境管理の評価手法を確立することは有意義である。著者らは文部科学省科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究プロジェクト（2006～2010年度）のなかで、生態系から受ける恩恵である「生態系サービス」を指標としたアセスメント技術の開発に取り組んできた¹⁾²⁾³⁾。

ここで筆者らは、流域圏を水・物質フラックス網と散在する「景観」（生態系）からなると捉え、この枠組みの中で各景観から生み出される「生態系サービス」を持続的に享受するための全体的な方策を論じてきた。しかしながら、流域圏に散在する「景観」はそれぞれ個別の性状をもつため、そこから生み出される生態系サービスの保全を考える上では、この固有性も議論に加える必要がある。そこで、本研究では、各景観のもつ生態系機能とそこから生み出される生態系サービスに着目し、これらを保全するための方策について議論した。本稿では、従来、流域圏管理の中心に位置付けられてきた湾域もひ

とつの景観要素として捉えて、並列的に議論した。

各々の景観要素に対しては、その生態系がもつ構造と機能、そこから生態系サービスが生み出される機構、人間活動が各生態系に影響を与える仕組みに着目し、議論を行った。また、これらの個別要素の固有性・共通性を論じることにより、個別景観要素の保全および流域単位的环境管理の方向性を示した。

2. 流域圏の構造の捉え方

流域圏は、土地利用や地形により規定される様々な景観要素から構成されている。また、これらの要素は、水や物質のフラックス網により相互に連結している。本研究では、この「散在する様々な景観要素」と「その連結」を流域圏の基本構造として捉えた。

景観間のつながりは、水の流れを基盤としており、上流から中・下流へと集約されていく。現在の流路網をみると、自然河川の他にも様々な用水路がかなり発達している。従って、これらの用水路も連結性を生み出す重要な要素として河川と同様に扱った。

以下の章では、流域圏内の景観要素として、おおよそ流路網に沿って、「森林」「農地」「河川」「滞水域」

「河口域」「沿岸域」「湾域」，を取り上げ，これらの景観の生態系のもつ特徴の固有性や共通性，関係性について議論した。

3. 各景観要素における生態系の構造と機能

(1) 生態系の基本構造の捉え方

生態系は複雑な構造性をもつが，本研究ではその要素を「物理的構造」「生物相」「生態的機能」に集約し，これらは三者の相互作用により生態系が機能していると考えた（図-1）。

「物理的構造」は，生態系の基盤をなす要素である。物質的な構造に限らず，光，温度などの因子も物理的構造として含まれる。物理的構造は生物の分布を決定づける上で大きな影響力をもっている。生態的機能もまた，光と光合成の関係にもあるように直接的に，あるいは生物相を介して間接的に，物理的要因に支配される。

ここでは「生物相」と名付けたが，生態的機能は必ずしも，「種」に依存するわけではなく，同様の役割をもつ多種により提供される場合も多い。また，生物群集として提供されるものもあるので，「生物相」を生態系の生物学的性状を包括するものとして提示する。この関係は，物理構造と生物についても同様であり，物理的構造は各生物の生息場適性を介して生物の生息を決定するが，これは様々なレベルに適応されるし，また全体的な群集構造を規定してもその構成種までは限定されないこともある。

以上のように，生態系における「生態的機能」は「物理的構造」「生物相」との相互関係で生み出されている。これら三者は相互関係性が深いので，個々の要素の変化は他の要素にも影響を与えていく。

これらの要素からなる生態系をひとつのコンパートメントとして見ると，ほとんどの生態系は閉鎖系ではなく，生態系外と物質やエネルギーのやり取りをしている。そ

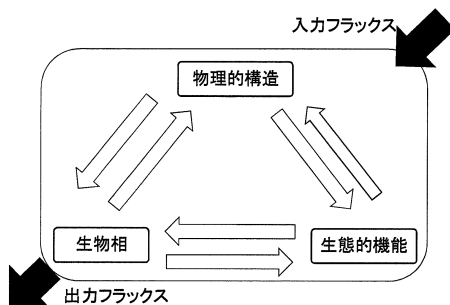


図-1 生態系の内部構造と外部との関係の概略図

こで，生態系のコンパートメントに対して，入力と出力を加えて，これを基本構造とした（図1）。この入力，出力，系内での循環，のバランスは，それぞれの系を特徴づける上で重要な要素である。

(2) 各景観要素における生態系の構造・機能の特徴と生態系サービス

各景観の生態系は，それぞれ特徴ある機能を有している。本節では，上述した基本構造を土台に生態系のもつ機能とそれから生み出される生態系サービスとを軸にして，各類型景観の生態系の特徴を述べたい。国連ミレニアム生態系評価⁹⁾では，生態系サービスを「供給」「調節」「文化的」「基盤」に分類しているが，ここでは，より直接的な恩恵である「供給」「調節」サービスを提示の対象とした。図-2には，個別景観要素の流域圏における配置関係，それぞれの系に対する入力と出力，これらの景観で生み出される代表的な生態系サービスを示した。

以下に，水・物質流路網の上流側から各景観要素の特徴を記述する。なお，生態系への入力として，流域圏の各要素間を連結している流路網を介するものとそれ以外のものを区別した。

a) 森林：

流域圏の最上流部に位置するため，水や物質は，大気から直接，あるいは，降水により入力される。森林は，木材の供給，CO₂の吸収（気候の調整），水源涵養（水の供給，水の調節）の働きをもつ。近年，大気汚染により降水に含まれる硝酸態窒素などが増加しているが，森林生態系はこの入力に対して，流出水の水質を調節する能力を有しているため，降雨負荷が多い地域では森林は水の浄化サービスも有すると言える。

木材は，生物相中のある有用種の一次生産に基づくサービスで，材の持ち出し→建材としての利用という一連

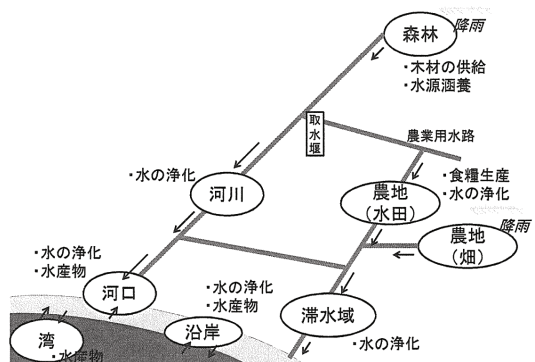


図-2 流域圏に散在する景観要素間の連結性と各景観要素から生み出される生態系サービス（供給・調節）

の過程により生み出されるCO₂の吸収も一次生産がもとになっている。それに対して、その他のサービスは森林生態系プロセス全体から生じている。

b) 農地：

農地，河川，滞水域，は，いずれも，河川流路網の中間に位置しており，上流側から入力を受け，下流側へと出力値を返す。

農地では，食糧生産が生態系サービスとして大きい。木材と同様，ある有用種の一次生産から生じるものである。作物生産のための施肥や用水路システムの発達はこの系の特徴である。この系での栄養塩収支を見ると，全体として，浄化作用を発揮することも，汚濁負荷源となることもある。前者としては，水田による水の浄化作用が代表的なものであり，これは水田土壌の表面の好気・嫌気境界面での脱窒作用によるところが大きい。この系では作物を持続的に収穫するために施肥がなされるが，この系が栄養塩の損失先になるか負荷源となるかは，脱窒のように系外に出すシステムが働かない場合，系の栄養塩保持能力に依存するとところが多い。

c) 河川：

ここでは，河川とひとくくりにしたが，上流側から下流側へと連続的な景観の変化をもつ。河川は，陸域と水域の連結点であり，おおむねの起源としては陸域から供給される物質を使って生態系が駆動されている。上流サイドでは落葉などの直接的な入力があるものの，主として，上流からの物質輸送に依存した系である。

供給サービスとして水産物の生産があげられる。この他，この系では上流から入力された物質が生物の生産性を担保し，食物連鎖を支えているので，栄養塩保持能力が高く，水の浄化の場として働く潜在的能力をもっていると言える。

d) 滞水域

連結関係的には上述した河川と類似しているが，大きな違いは「流入」→「系内での滞留」→「流出」の区別がはっきりしていることである。この系における特徴は河川より長い滞留時間である。この系にもたらされた栄養塩物質は植物に取り込まれ有機物化されるための時間が十分にあり，また系として河川と比べて攪乱の影響を受けにくいので，自生性・他生性の有機物の貯留地としての働きが大きい。湿地などが形成されることも多く，窒素を大気へと除去する脱窒の場としての働きも大きい。このため，基本的には，水の浄化がうまく働く場であると言える。

e) 河口域

河口域は，河川と海域とつなぐ系である。上述した滞水域と同様，湿地が形成され，また，河川からもたらされる物質を効率よく利用する系であるため，入力される河川水に対して水の浄化サービスが働く場として重要で

ある。また，河川と海域の推移帯としての環境傾度の大きさもこの系の特徴である。塩分濃度や底質の粒度，水深などが段階的に変化し，それに合わせて様々な生物が生息している。これは，この系の高い生産性を支える基盤であり，先の浄化能に対する寄与も大きい。シジミなど汽水性の生物は水産資源として有用であり，この取り出しも栄養塩除去としても有用である。

d) 沿岸域

沿岸域は，隣接する湖や湾など，より容積の大きな水体と相互方向につながっている。上記した河口域と同様，環境傾度が大きく，それに合せた生物が生息する。沿岸域は，アサリをはじめとする底生動物などの水産資源を供給する重要な場であり，また，水深が小さく，湾域と異なり全体的に底質まで光が届くため，生産層としての働きが大きく，水の浄化能も高い。

f) 湾域

河口域からの流入を受け，沿岸域や隣接した海域との相互的なやり取りがある系と言える。ただ，系外とのやり取りとこの系が抱える容量とのバランス的に閉鎖性が高く，独立性が高い系と言える。水産資源の供給場所として重要である。水深が深く有光層は表層に限られるため，一次生産者は浮遊藻類が主で，そこを起点とする食物連鎖により，水産資源をはじめとする高次生産が機能している。沈降有機物の一部は，底泥堆積物として貯留されるため，有機物と栄養塩の損失先として働く。

以上，各景観要素の特徴を示したが，「供給」サービスはある特定種の生産に依存し，「調節」サービスは，それに加えて，生態系過程の全体的な収支による働きにもよるところが多いと大別される。

ここで，上記で扱わなかった，基盤サービスについて補足する。このサービスは，「供給」「調節」サービスを支える個々の生態的機能を示している。供給サービス自体はある種の生産に依存しているが，農作物は土壌の働きに，水産資源はその食物連鎖にも大きく依存している。そういう意味で，機能面からみた「基盤サービス」や，サービスではないが生物面からみた「生物多様性」は，これらのサービスを支える要素として重要な位置を占めていると指摘できる。とくに，生態系の過程から全体的に生み出される調整サービスは，基盤サービスと関わり合いが深いと言える。

4. 各景観要素の生態系サービスに対する人為的な影響

前章では，供給サービスと調整サービスと，それらを支える要素として，基盤サービスと生物多様性を上げた

が、現在、各景観要素が受けている人為的影響をサービス群との関係を軸にして述べていく。なお、図-3には、流域圏の各景観の生態系に対する様々な人為的影響を「生態系の基本構造の三者」と「入力」との関係で例示した。

まず、供給サービスを取り上げる。農地ではこのサービスを上げるための施肥や水運用システムの発達などがなされており、サービスの増大を遂げている。しかし、一方で、土壌の流出等の影響により、他の水域への汚濁源として指摘されたり、水路システムの高度化という物理場の改変により、氾濫原の生物の生息環境として悪化してきた。これらことは、農地のもつ基盤サービスにも影響を与えている可能性が指摘される。つまり農地は、ある生態系サービスを人為的に増大させることにより、他のサービスに影響を与えている系と特徴づけられる。

次に、森林について述べる。木材供給サービスの需要は、輸入材との関係性で大きく変化してきた。しかし、前述したように、木材の生長・取り出しは、CO₂の吸収・固定にも役立っていることから、この系の調整サービスにも間接的に変化を与えていると言える。また、天然林と人工林など、各林分ごとに栄養塩や水の調整能も異なることが想定されるため、林分の利用形態の変化は森林の生態系サービスの変化をもたらす重要な因子と言える。また、化石燃料の燃焼による降水からの栄養塩負荷の増加は、森林の栄養塩保持能を変え、流出水の水質に影響を与えてとの報告⁹もあり、森林生態系への影響が懸念される。

水産資源は、農作物や木材とは異なり、供給側の要因により減少傾向がみられる。多くの水産資源は消費者であるため、食物網などの群集構造と密接に関係している。このため、赤潮の発生や貧酸素水塊の影響により、生態系の群集構造が変化を受けるとその影響を直接的、間接的に受けやすい。

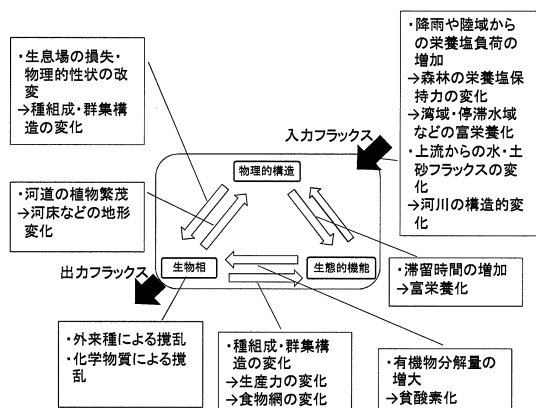


図-3 生態系に及ぼす人為的影響の例

流域は河川からの栄養塩負荷を受けるが、この量がいわゆる環境容量やあるいは生態的閾値を越えると、生態系としての構造や機能は大きく変化する⁷。これは、多くの水域、とくに閉鎖性水域、で問題を引き起こしている。これとは別の要因として、干潟や河口域など、漁場として重要な場所が埋め立て等により消失したことが上げられる。

調整サービスとしての水の浄化について述べる。前に述べたように、流域圏のほとんどの景観が有する。水の浄化サービスは、過剰な栄養塩を貯留したり、除去するサービスであり⁸、一次生産や高次生産を通じての生物体への栄養塩の貯蓄、生物体の人為的・自然的な取り上げ、脱窒作用、などにより提供される。このサービスは生態系の過程が全体的に機能して生み出されるものである。このため、このサービスは、系への環境容量を超える負荷、あるいは、物理的構造の改変、生息場環境の変化により、系の生物群集の構成や生態系機能が大きく変化した場合、大きく影響を受けると推測される。流域圏全体としては、湿地が付随するような、滞水域、河口域、沿岸域など、水の浄化サービスを大きく発揮する景観が埋め立てなどにより損失したことが、水の浄化サービスを劣化させた大きな要因である。

5. 環境修復技術の開発

以上までの議論から、生態系機能あるいはサービスを維持するには、生息場の変化など内部的な要素と、生態系全体に影響を及ぼす外部からの入力とともに重要と考えられる。いずれの景観要素でもこれらが複合的に絡んで、サービスや機能が発揮している。

(1) 生息場の保全について

内部的な要素である、生息場としての物理場の保全・修復は、供給サービスの土台整備として有用であることは当然であるが、生態系におけるほとんどの機能が生物相の役割に依存していることから、「基盤サービス」あるいは「生物多様性」を保全する上で大きな意味もつ。とくに従来から物理的構造が変化したような系では生物相が大きく変わり、場としての機能に大きく影響してきたことが考えられる。

生息場環境の改変の要因としては、埋め立てや掘削など、直接的な改変の他に、河川や干潟などで見られるように、河川の土砂輸送量が変化したことによる間接的な改変もみられる。このことを交えると、生息場の整備手法としても、対象地点への直接的な修復と、土砂供給量を増加させるなど、従来の機能を回復する方法があげら

れる。これらの方法は、確実性や持続性、あるいは効果の伝播範囲が異なるため、手法の選定に関しては対象地点だけでなくその周囲も含めた議論が必要と推測される。

また、物理場の保全・修復が生息場としてきちんと機能するか、あるいは、土砂の供給がどのように下流地点の物理場を形成するのか、については不確定な要素が多い。このため、いずれの方法をとるにしても、その効果を常に監視していくことが必要である。生態系に手を加えたときの応答は各要素が連動して動くため、非常に予測が困難であるが、しっかりとした情報収集と解析が修復や保全に役立つと考えられる。

一方、農地の水路システムでは、やはり氾濫原生物の生息場としての機能も回復する必要があると思われる。なぜなら、氾濫原は流域圏単位で開発が進み、ほとんど存在しない系だからである。もともと流域圏がもっていた機能を保持するためにも、水田などで氾濫原湿地としての役割をある程度担保することができれば、流域圏単位での役割は大きいと思われる。構造自体を変える他にも、氾濫原生物の生活史に合せた水路運用をしたり、避難場を設けるなど、生息場保全に向けて様々な方法で取り組める場であると考えられる。

(2) 流域圏単位での栄養塩動態の管理

次に、流域圏全体に広く影響が波及する栄養塩負荷について述べる。現在、いわゆる富栄養化問題を抱えている系は、基本的に栄養塩負荷が過剰であると言える。とくに湾などで顕著であるが、これは湾に面して発達した都市域からの流入量の増加が大きな要因である。しかしながら、流域圏全体で見たとき、水の浄化サービスの場としての機能性が高い景観要素の損失が大きいのも事実である。つまり、流域全体としては、栄養塩の供給源が増え、栄養塩の損失先が減少しており、これが湾の環境変化を引き起こしたと考えられる。

この修復としては、負荷を抑えること、できるだけ浄化サービスの発揮場所を整備すること、あるいはできるだけ浄化サービスが発揮できるように場を整備することが重要である。

負荷の削減に関しては、対象とする系における許容量を見積もることが有意義であり、これが系に対する入力値の上限目標となる。ただし、系内が変化する場合、少なくとも栄養塩の入力値の変化自体が生態系としての構造と機能を変えるので、これはつねに変動する要素として捉える事が必要である。

外部からの栄養塩の負荷の変化が、どのように湾域の生態系の構造と機能を改変させていくかは、不確定な要素が大きい。栄養塩などの負荷の、質的（濃度・形態）、量的、時間的要素と湾域の生態系の応答について、比較的長期のモニタリングを行いながら、湾域での環境修復

作業を進めていく必要がある。一方、湾域では、これ以外に生息場の改変も受けており、生息場の修復もまた必要である。

湾域の環境修復を進めていく上で、入力としての河川からの栄養塩負荷量、受け手側の湾域の水質やクロロフィル量、あるいは個々の生物種の現存量などを、湾に対する圧力の指標、湾域環境の指標、生物指標として扱い、湾域生態系の応答を複合的に監視しながら、順応的に管理していくことが求められる。

6. まとめ

流域圏は、様々な景観要素を抱え、様々な生態系サービスを生み出している。それぞれが異なった人為的影響を受けている一方、共通性や関連性も高い。

個別景観に固有な要素は、個々に対応されるべきであるが、栄養塩負荷のように共通性・関連性のあるものは横断的・複合的に対処していくことが必要である。

また、個別景観の問題を修復するにあたって、流域圏、ある河川の流域、上、中、下流域など、様々なスケールで、種々の生態系機能やサービス、あるいは生息場の変遷を図化できれば、全体的視点をもって、修復場所の選定や修復の効果の予測ができる。これも流域圏単位的环境管理技術として有意義な方法であろう。

流域圏単位という視点では、水・物質のフラックス網も重要な役割をもっている。本稿ではこれまで各景観と各景観を結ぶ要素、つまり、入力を与え、出力を返されるものとして捉えてきたが、フラックス網は、現在、水のエネルギーや資源としての利用と絡み、改変を大きく受けている場でもある。その構造的あるいは水量的な連続性の切断は、河川において生息場環境や生態的機能を大きく変えている。フラックス網の役割を評価し、それが受けている影響と生態系との関係をきちんと押さえ、フラックス機能あるいはそれにより損傷を受けた生態系を回復させる方策について論じることが必要である。

最後に、流域圏単位では、多様性を内包しつつ、全体的な視点を交えて議論していかなければならない。環境問題やその修復・保全は多くの要素が絡んでいる。それぞれの系に与える影響を詳細に解析し、総合的に理解することにより、環境問題に関する圧力との関係を詳しく評価できれば、例えば、圧力の削減、生物の種組成や現存量、生態系機能など、複数の指標をもって、複合的に環境管理を進めていく方策が得られることが期待できる。

謝辞：本研究は、2006-2010年度採択、文部科学省振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究の一環として行った。当プロジェクトの構成員であ

る, 名古屋大学, 国土技術総合研究所, 土木研究所, 国立環境研究所, 農村工学研究所, 水産工学研究所. 養殖研究所に所属する研究員の有意義な助言・討議に謝意を表する.

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 戸田祐嗣, 尾花まき子: 伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発研究プロジェクトのねらい, 河川技術論文集, Vol. 13, pp.291-296, 2007.
- 2) 辻本哲郎, 戸田祐嗣, 尾花まき子: 自然共生型流域圏環境アセスメントの評価枠組みの構築, 第 36 回環境システム研究論文発表会講演集, pp.271-276, 2008.
- 3) 辻本哲郎, 戸田祐嗣, 尾花まき子, 安佛かおり: 自然共生型流域圏環境管理一流域圏フラックス網に連結された景観が果たす役割の評価—pp.21-26, 2009.
- 4) 高岡広樹, 戸田祐嗣, 辻本哲郎: 流域圏の自然共生型アセスメントのための水・物質モデル. 第 37 回環境システム研究論文発表会講演集, pp.7-12, 2009.
- 5) Millenium ecosystem assessment: 国連ミレニアムアセスメント評価—生態系サービスと人類の将来—, 横浜国立大学 21 世紀 COE 翻訳委員会, オーム社, 2007.
- 6) Aber, J. D., Nadelhoffer, K. J., and Melillo, J. M.: Nitrogen saturation in northern forest ecosystem -excess nitrogen from fossil fuel combustion may stress the biosphere, *BioScience*, Vol.39, pp.378-386, 1989.
- 7) Groffman, P. M., Baron, J. S., Blett, T., Gold, A. J., Goodman, I., Gunderson L. H., Levinson, B. M., Palmer, M. A., Paerl, H. W., Peterson, et al.: Ecological thresholds: the key to successful environmental management or an important concept with no practical application?, *Ecosystems*, Vol. 9, 1-13, 2006.
- 8) Millenium ecosystem assessment: Ecosystems and Human Well-being: Current and Trends assessment, pp. 551-583. Island Press, 2005.

ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR RIVER BASIN COMPLEX BASED ON THE ECOLOGICAL FUNCTIONS OF INDIVIDUAL LANDSCAPE

Kaori ANBUTSU, Yuji TODA and Tetsuro TSUJIMOTO

The river basin complex is a set of the bay region and the rivers facing it. Each river basin is composed of various landscapes which have connections with each other.

We focused on this structure of the river basin complex and the ecological function from individual landscape for environmental management on the scale of the river basin complex. Ecological functions of each landscape are related with both of the internal structure and the external input. Therefore, those factors are important in order to characterize the functions of individual landscape and to analyze anthropogenic impact on them. We indicated the internal structure using physical structure, habitat and community structure, and indicated the external input using nutrient load. We discussed uniquenesses, similarities and relationships among landscapes, and showed the way to build up comprehensive environmental managements.