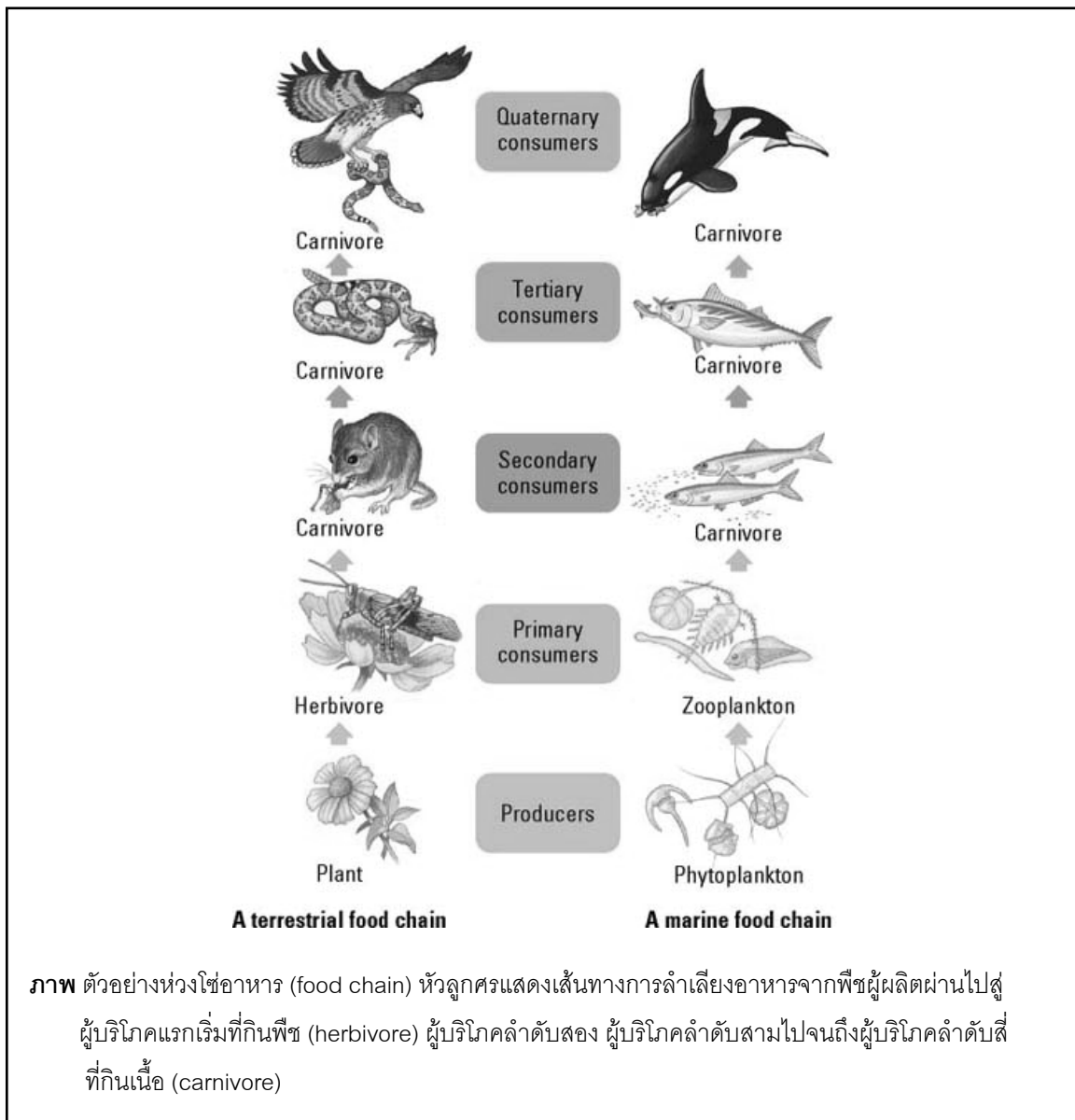




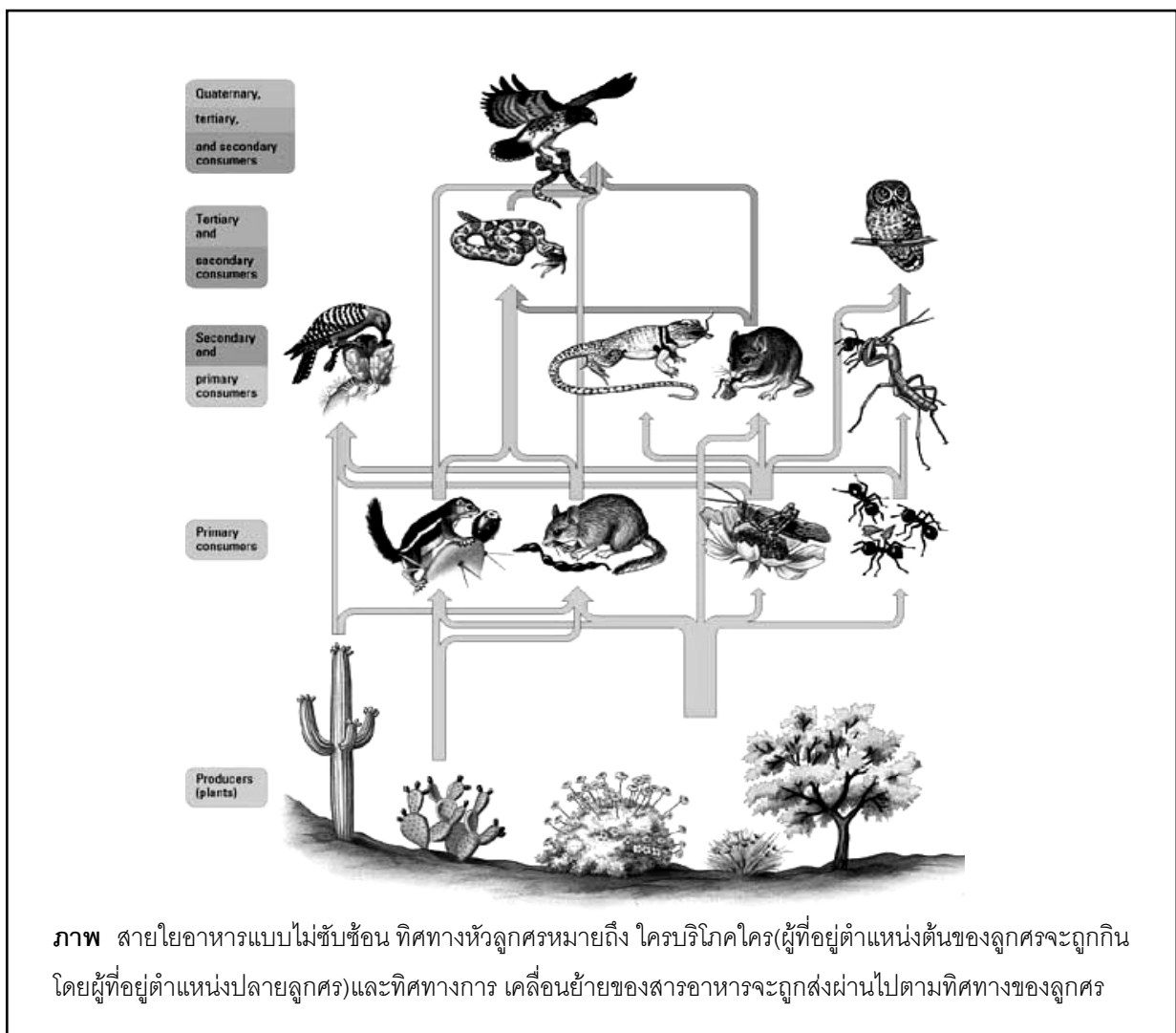
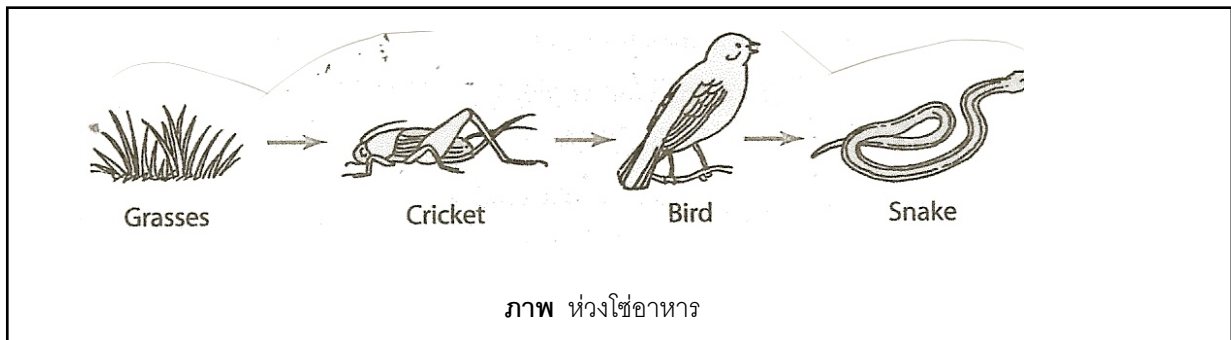
การถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศ

พลังงานในระบบนิเวศเริ่มจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผ่รังสีมายังโลก ผู้ผลิตในระบบนิเวศจะเป็นพวกแรกที่สามารถนำพลังงานจากดวงอาทิตย์ไว้ได้ ในขบวนการสังเคราะห์แสงผู้ผลิตซึ่งเป็นพืชที่มีคลอโรฟิลล์ จะเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมี แล้วนำพลังงานเคมี นี้ไปสังเคราะห์สารประกอบ ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีพลังงานสูง เช่น คาร์โบไฮเดรต (CH_2n) ได้ ผลผลิตเบื้องต้น คือ กลูโคส ในกระบวนการนี้มีแก๊สออกซิเจนปล่อยออกสู่บรรยากาศ พลังงานในโมเลกุลของสารอาหารจะถ่ายทอดจากผู้ผลิตสู่ผู้บริโภคลำดับต่างๆ จนถึงผู้ย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งพลังงานจะมีค่าลดลงตามลำดับ เพราะส่วนหนึ่งถูกใช้ในการผลิตพลังงานให้แก่ร่างกายโดยกระบวนการหายใจ อีกส่วนหนึ่งสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน เนื่องจากทุก ๆ ลำดับขั้นของการถ่ายทอดจะมีพลังงานสูญเสียไปในรูปของความร้อนประมาณ 80-90% ดังนั้นลำดับการถ่ายทอดพลังงานในโซ่อาหารจึงมีความยาวจำกัด โดยปกติจะสิ้นสุดที่ผู้บริโภคลำดับ 4 - 5 เท่านั้น ระบบนิเวศได้รับพลังงานไว้ได้มากย่อมแสดงให้เห็นว่าระบบนิเวศนั้นมีความอุดมสมบูรณ์มาก





การเคลื่อนย้ายหรือถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศในรูปของอาหารจากผู้ผลิตไปสู่ผู้บริโภค และจากผู้บริโภคไปสู่ผู้บริโภคอันดับต่อไปเป็นลำดับขั้นมีลักษณะเป็น "ลูกโซ่อาหาร" หรือ "ห่วงโซ่อาหาร" (food chain) ในสภาพธรรมชาติจริง ๆ แล้ว การกินกันอาจไม่ได้เป็นไปตามลำดับที่แน่นอน เช่น ที่กล่าวมาเพราะผู้ล่าชนิดหนึ่งอาจจะล่าเหยื่อได้หลายชนิดและขณะเดียวกันนี้ อาจจะตกเป็นเหยื่อของผู้ล่า การถ่ายทอดพลังงาน จึงมีความซับซ้อนมากขึ้น และสัมพันธ์เกี่ยวโยงกัน ไปมาในลักษณะ "สายใยอาหาร" หรือ "สายใยอาหาร" (food web)





การถ่ายทอดพลังงานในห่วงโซ่อาหาร

การถ่ายทอดพลังงาน ในห่วงโซ่อาหารอาจแสดงในลักษณะของสามเหลี่ยมพีรามิดของสิ่งมีชีวิต (Ecological pyramid) แบ่ง ได้ 3 ประเภทตามหน่วยที่ใช้วัดปริมาณของลำดับขั้นในการกิน

1. พีรามิดจำนวนของสิ่งมีชีวิต (Pyramid of number)

โดยทั่วไปสัดส่วนของจำนวนสิ่งมีชีวิตจะมีลักษณะเป็นรูปพีรามิดฐานกว้าง โดยผู้ผลิต ซึ่งมีจำนวนมากที่สุดอยู่ตรงตำแหน่งฐานพีรามิด ผู้บริโภคลำดับต่างๆ ที่อยู่ถัดขึ้นไปตามลำดับจะลดลง

ตัวเลขที่อยู่ในพีรามิดแต่ละชั้นแสดงจำนวนสิ่งมีชีวิตในแหล่งที่อยู่ จะเห็นได้ว่าพื้นที่ 1 ตารางเมตรของสระน้ำจืดมีผู้ผลิตอยู่จำนวนมากมาย ส่วนผู้บริโภคแต่ละลำดับจะมีจำนวนลดหลั่นกันไป จนถึงผู้บริโภคลำดับ 3 ซึ่งเป็นผู้บริโภคลำดับสุดท้าย เช่น มีผู้บริโภคลำดับสุดท้าย 0.01 ตัวต่อตารางเมตร การที่จำนวนของสิ่งมีชีวิตที่นับได้ ไม่เป็นจำนวนเต็มเนื่องจากเราคำนวณหาจำนวนสิ่งมีชีวิตบริเวณผิวของสระน้ำจืดในพื้นที่ 1 ตารางเมตรเท่านั้น ซึ่งตามความเป็นจริงสระน้ำจืดนี้ มีพื้นที่มากกว่า 1 ตารางเมตร เมื่อคำนวณจำนวนสิ่งมีชีวิตที่เป็นผู้บริโภคอันดับ 3 บนผิวของสระน้ำจืดทุกๆ 1 ตารางเมตร ซึ่งมีจำนวนน้อย ผลลัพธ์จึงไม่เป็นเลขจำนวนเต็ม

พีรามิดของจำนวนสิ่งมีชีวิตอาจไม่จำเป็นต้องมีลักษณะของพีรามิดฐานกว้างเพียงอย่างเดียว ระบบนิเวศสวนลำไยแห่งหนึ่งมีลำไย 200 ต้น และบริเวณต้นลำไยเป็นแหล่งที่อยู่ของกลุ่มสิ่งมีชีวิตหลายชนิด ได้แก่ ผึ้ง แมลงวันทอง นก นกฮูก จะเห็นได้ว่าผึ้งและแมลงวันทองที่อาศัยกินน้ำหวานจากดอกลำไยนั้นมีจำนวนมากกว่าต้นลำไยหลายเท่า พีรามิดจำนวนสิ่งมีชีวิตของระบบนิเวศ

2. พีรามิดมวลของสิ่งมีชีวิต (pyramid of mass)

โดยพีรามิดนี้แสดงปริมาณของสิ่งมีชีวิตในแต่ละลำดับขั้นของการกินโดยใช้มวลรวมของน้ำหนักแห้ง (dry weight) ของสิ่งมีชีวิตต่อพื้นที่แทนการนับจำนวนพีรามิดแบบนี้มีความแม่นยำมากกว่าแบบที่ 1 แต่ในความเป็นจริงจำนวนหรือมวล ของสิ่งมีชีวิตมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา เช่น ตามฤดูกาลหรือ ตามอัตราการเจริญเติบโต ปัจจัยเหล่านี้ จึงเป็นตัวแปร ที่สำคัญ

อย่างไรก็ดีถึงแม้มวลที่มากขึ้นเช่นต้นไม้ใหญ่ จะผลิตเป็นสารอาหารของผู้บริโภคได้มากแต่ก็ยังน้อยกว่าที่ผู้บริโภคได้จาก สิ่งมีชีวิตเล็กๆ เช่น สาหร่ายหรือแพลงก์ตอน ทั้งๆที่มวล หรือปริมาณของสาหร่ายหรือแพลงก์ตอนน้อยกว่ามาก ดังนั้น จึงมีการ พัฒนาแนวความคิดในการแก้ปัญหานี้ โดยในการเสนอรูปของพีรามิดพลังงาน (pyramid of energy)

3. พีรามิดพลังงาน (pyramid of energy) เป็นพีรามิดแสดงปริมาณพลังงานของแต่ละลำดับขั้นของการกินซึ่งจะมีค่าลดลงตามลำดับขั้นของการกิน

การถ่ายทอดพลังงานในระบบนิเวศมีความสำคัญมากเพราะไม่เพียงแต่สารอาหารเหล่านั้นมีการถ่ายทอด

แต่สารทุกชนิดที่ปนเปื้อนอยู่ในระบบนิเวศทั้งที่เป็นประโยชน์และเป็นโทษจะถูกถ่ายทอดไปในโซ่อาหารด้วย ตัวอย่างเช่น การใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชพวกแมลง สารเคมีกำจัดเชื้อรา ที่รู้จักกันดีคือ DDT ซึ่งสารเคมีชนิดนี้จะสลายตัวยาก มีความคงตัวสูง ทำลายระบบประสาทแมลงได้ดี เนื่องจากมีโลหะหนักที่เป็นพิษเจือปนอยู่ เช่นปรอท

ตะกั่ว หรืออาร์เซนิก สารดังกล่าวจะตกค้างในผู้ผลิตและผู้บริโภคและถ่ายทอดไปตามลำดับในโซ่อาหารซึ่งปริมาณ



DDT จะเพิ่มความเข้มข้นขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละลำดับของชั้นอาหาร เช่น เนื้อของนกกินปลา 1 กรัม จะมี DDT สะสมมากกว่าเนื้อปลาที่มีน้ำหนักเท่ากัน

แหล่งชุมชนที่อยู่อาศัยของแต่ละผู้คนในแต่ละแหล่งก็มีการถ่ายเทของเสียออกสู่ธรรมชาติ และกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น ร้านอาหาร ตู้ช้อปปิ้ง โรงแรม โรงงานอุตสาหกรรม และแหล่งเกษตรกรรม ทำให้มีของเสียปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมและสะสมอยู่ตามแหล่งน้ำ ดิน อากาศ ของเสียเหล่านี้จะถ่ายทอดไปสู่ผู้ผลิต และผู้บริโภคลำดับต่างๆ รวมถึงกลับมาสู่ตัวมนุษย์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในโซ่อาหาร ทำให้มีผลกระทบต่อสุขภาพ ของเสียบางอย่างยังเป็นที่มีพิษรุนแรง เช่น พวกโลหะหนัก ถ้าร่างกายได้รับสารนั้นในปริมาณมาก อาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้

ในบางกรณีของเสียหรือสารพิษที่สะสมอยู่ในแหล่งต่างๆ อาจไม่ถ่ายทอดถึงมนุษย์ เพราะเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคในลำดับต้นๆเสียก่อนแล้ว ทำให้โซ่อาหารถูกทำลาย แต่มนุษย์ก็ได้รับผลกระทบเช่นกัน ทั้งในแง่ที่ขาดแคลนอาหารและส่งผลถึงเศรษฐกิจด้วย ดังนั้นจึงควรมีการป้องกันและการจัดการเกี่ยวกับการกำจัดของเสียอย่างถูกต้อง

ในระบบนิเวศ ทั้งสสารและแร่ธาตุต่าง ๆ จะถูกหมุนเวียนกันไปภายใต้เวลาที่เหมาะสมและมีความสมดุลซึ่งกัน และกัน วนเวียนกันเป็นวัฏจักรที่เรียกว่า วัฏจักรของสสาร (matter cycling) ซึ่งเปรียบเสมือนกลไกสำคัญ ที่เชื่อมโยงระหว่าง สสาร และพลังงานจากธรรมชาติสู่สิ่งมีชีวิตแล้วถ่ายทอดพลังงานในรูปแบบของการกินต่อกันเป็นทอดๆ ผลสุดท้ายวัฏจักรจะสลายใน ขั้นตอนท้ายสุดโดยผู้ย่อยสลายกลับคืนสู่ธรรมชาติ วัฏจักรของสสารที่มีความสำคัญต่อสมดุลของระบบ นิเวศน์ ได้แก่ วัฏจักรของน้ำ วัฏจักรของไนโตรเจน วัฏจักรของคาร์บอนและ วัฏจักรของฟอสฟอรัส



วัฏจักรของสาร (Biogeochemical cycle)

สิ่งมีชีวิตประกอบขึ้นจากสารต่าง ๆ มากมาย หากจะไล่ลงไปทีละขั้น ๆ ตามลักษณะการเป็น Biosystem จะพบว่าแท้จริงแล้วสิ่งมีชีวิตประกอบขึ้นมาจากธาตุ (Element) ต่าง ๆ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในโลกนั่นเอง ในโลกนี้มีธาตุประมาณ 112 ชนิด แต่มีธาตุพื้นฐาน (Basic element) เป็นองค์ประกอบหลักของสิ่งมีชีวิตอยู่ประมาณ 6 ธาตุเท่านั้น นั่นคือ C H O N P S และมีธาตุพื้นฐาน 30-40 ชนิด เป็นองค์ประกอบที่สำคัญแตกต่างกันไป นอกจากนั้นก็มีธาตุที่เป็น Trace element ซึ่ง**จำเป็น** (ต้องการในปริมาณน้อย แต่ขาดไม่ได้) ต่อสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะจัดกระจายอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ ประกอบตัวในรูปสารอินทรีย์บ้าง อยู่ในรูปสารอนินทรีย์บ้าง โดยมีการเปลี่ยนแปลงหมุนเวียนเป็นวัฏจักร

Periodic Table of the Elements																		
GROUP IA																VIII		
1	H																	2
2	Li	Be															10	
3	Na	Mg															18	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub						
				57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
				La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
				89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
				Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

GROUP
IA

IIA

IIIB

IVB

VB

VIB

VIIIB

IB

IIB

IIIA

IVA

VA

VIA

VIIA

VIIIA

PERIOD

1

2

3

4

5

6

7

ภาพที่ 1 ตารางธาตุ

ภาพที่ 1 ตารางธาตุ

บทบาทหน้าที่ของระบบนิเวศมีความสัมพันธ์อยู่กับการถ่ายทอดพลังงานและมวลสาร การถ่ายทอดมวลสารจากสิ่งมีชีวิตหนึ่งไปยังอีกสิ่งมีชีวิตหนึ่งนอกจากจะทำให้เกิดการถ่ายทอด “ธาตุ” ที่เป็นองค์ประกอบจากสิ่งมีชีวิตหนึ่งไปสู่ผู้บริโภคแล้ว ยังเป็นการคืน “ธาตุ” บางส่วนกลับสู่สภาพแวดล้อมด้วย ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตมักจะอยู่ในรูปสารอินทรีย์ เมื่อมีการตายกลายเป็นเศษซาก หรือมีการขับถ่ายของเสีย สารประกอบอินทรีย์เหล่านี้จะถูกย่อยสลายเปลี่ยนแปลงให้เป็นสารอนินทรีย์ปะปนอยู่ในแหล่งธรรมชาติต่าง ๆ สารประกอบเหล่านี้บางตัวจะอยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตอื่นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เกิดการหมุนเวียนธาตุจากสิ่งมีชีวิตสู่สิ่งแวดล้อม และจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่สิ่งมีชีวิต หมุนเวียนเป็นวัฏจักรเพื่อรักษาสมดุลของสภาพธรรมชาติไว้



สิ่งมีชีวิตต้องการสารต่าง ๆ มาใช้ในการดำรงชีวิต ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นธรณีภาค(lithosphere) (คือ ชั้นเนื้อโลกส่วนบนกับชั้นเปลือกโลกรวมกัน) ชั้นธรณีภาคมีความหนา ประมาณ 100 กิโลเมตรนับจากผิวโลกลงไป) อุทกภาค (Hydrosphere) (คือ ส่วนที่เป็นน้ำทั้งหมด โดยที่สำคัญและจะกล่าวถึงในที่นี้ได้แก่ มหาสมุทร (Ocean) และส่วนที่เป็นน้ำแข็งที่ปกคลุมพื้นโลก (Cryosphere))

หรือแม้แต่ในบรรยากาศ ต่างก็มีสารที่สิ่งมีชีวิตปะปน/เป็นองค์ประกอบอยู่ทั้งสิ้น สารต่าง ๆ เหล่านี้สามารถหมุนเวียนจากภาคหนึ่งไปสู่อีกภาคหนึ่งได้ หรืออาจหยุดชั่วคราวไม่หมุนไม่เปลี่ยนแปลงก็ได้ ดังนั้นจึงอาจแบ่งขั้นตอนการหมุนเวียนออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. แหล่งกักเก็บสาร (Reservoir pod or Unactive zone) เป็นขั้นตอนที่สะสมไว้ในสิ่งแวดล้อม ยังไม่เคลื่อนย้ายเข้าสู่สิ่งมีชีวิต เป็นแหล่งที่มีขนาดใหญ่ ปริมาณมาก และไม่เคลื่อนย้าย
2. แหล่งแลกเปลี่ยนสาร (Exchange pod or Active Zone) เป็นขั้นตอนที่มีการแลกเปลี่ยนในสิ่งมีชีวิต (ช่วงที่สิ่งมีชีวิตมีการเคลื่อนเข้าหรือเคลื่อนออกของสาร)

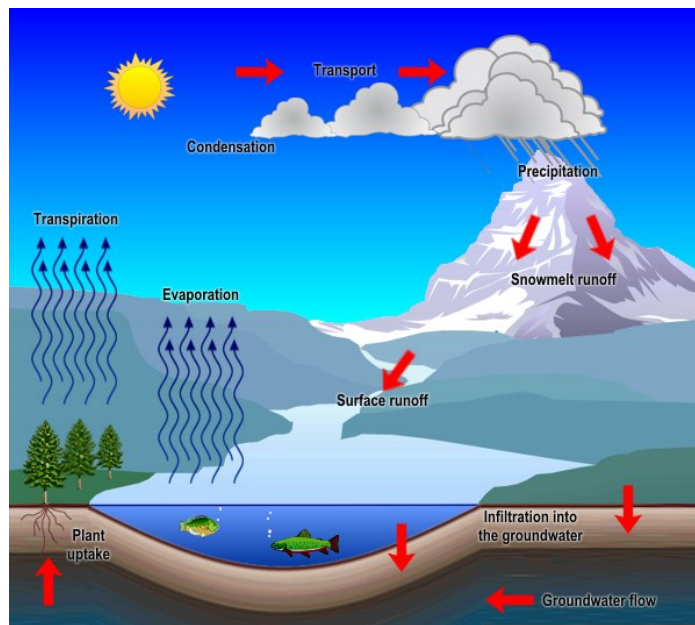
วัฏจักรของสารต่าง ๆ อาจแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ

1. Hydrologic cycle ซึ่งโดยทั่วไปจะหมายถึงวัฏจักรของน้ำ
2. Gaseous cycle (Atmospheric cycle) วัฏจักรการเคลื่อนย้ายธาตุที่มีแหล่งสำรองส่วนใหญ่อยู่ในบรรยากาศ และทะเลเช่น วัฏจักรคาร์บอน วัฏจักรออกซิเจน และวัฏจักรไนโตรเจน
3. Sedimentary cycle (Lithospheric cycle) วัฏจักรการเคลื่อนย้ายธาตุที่มีแหล่งสำรองส่วนใหญ่อยู่ในภาคพื้นดิน มักปรากฏในรูปของแข็ง และเข้าสู่วัฏจักรเมื่อมีการผุพัง (Weathering) เช่น วัฏจักรฟอสฟอรัส วัฏจักรแคลเซียม และวัฏจักรซิลิเคต แต่เนื่องจากวัฏจักรน้ำมีความใกล้ชิดกับวัฏจักรคาร์บอนและออกซิเจน บางครั้งจึงมีการรวมไว้ในกลุ่มวัฏจักรเดียวกัน

วัฏจักรน้ำ (Water Cycle)

น้ำเป็นสสารชนิดเดียวที่ปรากฏในธรรมชาติพร้อมกันทั้ง 3 สถานะเป็นสารที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตในชีวนิเวศ โดยเฉพาะการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต ปริมาณของน้ำในโลกคิดเป็น 75 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมดหรือประมาณ 1,360 ล้าน ลูกบาศก์กิโลเมตร อยู่ในสภาพน้ำเค็ม (97.2%) น้ำจืดในแม่น้ำและทะเลสาบ (0.0171%) น้ำใต้ดิน (0.625%) น้ำแข็งขั้วโลก (2.15%) และไอน้ำ (0.001%) การหมุนเวียนของน้ำจะมีความสัมพันธ์กับการระเหย และการกลั่นตัวเป็นฝน วงจรการหมุนเวียนจะกินเวลาประมาณ 9-10 วัน

น้ำนอกจากจะเป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตแล้วยังมีบทบาทในการคงอุณหภูมิของโลกด้วย ไอน้ำในบรรยากาศเป็นเสมือน Buffer ที่ทำให้อุณหภูมิโลกคงที่ หากมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้นอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะค่อย ๆ กลับสู่อุณหภูมิปกติของโลก น้ำยังเป็นที่อยู่อาศัยขนาดใหญ่ที่สุดสำหรับสิ่งมีชีวิตในโลกนี้อีกด้วย สภาพน้ำที่แตกต่างกันระหว่างมหาสมุทร และแม่น้ำ ลำธาร ทำให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำที่แตกต่างกันนี้มีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างยิ่ง สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในท้องทะเลจะดำรงชีวิตอยู่ได้ดีที่ pH มากกว่า 8 เมื่อใดก็ตามที่ pH ลดลงต่ำกว่า 7.5 สัตว์ทะเลจะตายโดยเฉพาะไข่และตัวอ่อน เปลือกของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ จะสูญเสีย Carbonate ออกไปในรูปของสารละลาย สำหรับสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแหล่งน้ำจืดจะดำรงชีวิตได้ดีในช่วง pH 6.8-8.4 และไม่สามารถดำรงชีวิตได้ที่ pH ต่ำกว่า 4 หรือมากกว่า 11 (ส่วนพืชบกจะดำรงชีวิตได้ดีในช่วง pH ประมาณ 6 สมบัติของน้ำที่มีความสำคัญต่อพืชอีกประการหนึ่งคือ การมี Cohesion สูงทำให้ลำเลียงน้ำจากรากสู่ยอดได้)

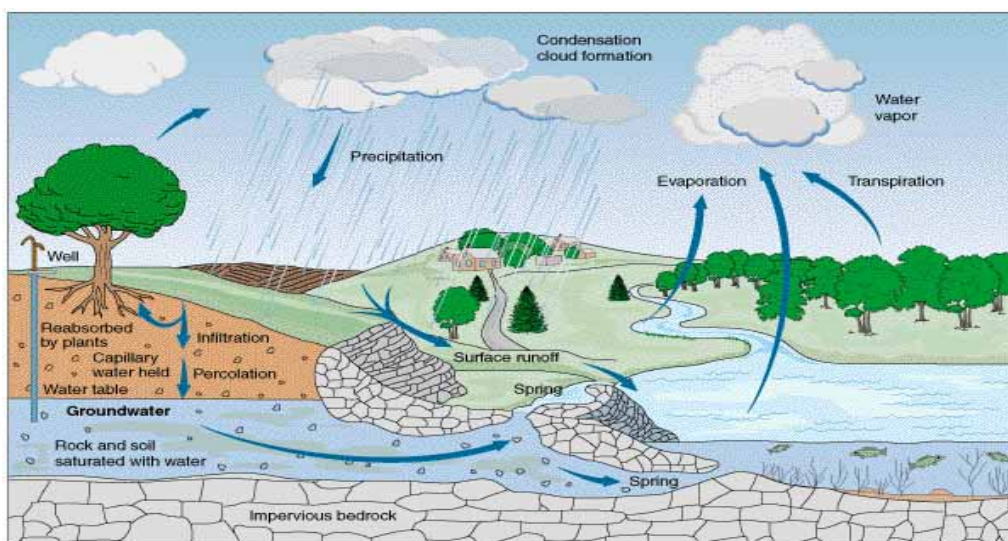


ภาพที่ 2 แหล่งน้ำต่าง ๆ

วัฏจักรน้ำประกอบด้วยวงจร 2 วงจรคือ

1. วัฏจักรระยะสั้น (Short cycle) เป็นการหมุนเวียนน้ำโดยไม่ผ่านสิ่งมีชีวิต เกิดจากการระเหยของน้ำ (evaporation) บริเวณผิวโลกเนื่องจากได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ ขึ้นไปรวมตัวกันเป็นกลุ่มเมฆและเกิดการควบแน่น (condensation) จนกลั่นตัว (Precipitation) ลงมาเป็นฝนตกลงสู่ผิวโลกอีกครั้งหนึ่ง เป็นวัฏจักรที่เกิดขึ้นโดยอาศัยการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากการรับพลังงานโดยตรง

2. วัฏจักรระยะยาว (Long cycle) เป็นการหมุนเวียนน้ำโดยผ่านสิ่งมีชีวิต สิ่งมีชีวิตรับน้ำเข้าสู่ร่างกายเพื่อใช้ในการรักษาสมดุลและเมตาบอลิซึมต่าง ๆ น้ำที่เหลือจากการนำไปใช้ และน้ำที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ จะถูกขับจากร่างกายของสิ่งมีชีวิต เช่น การคายน้ำของพืช (Transpiration) การหายใจ (Respiration) การขับปัสสาวะ การขับเหงื่อ น้ำเหล่านี้จะเข้าสู่ชั้นบรรยากาศในรูปของไอน้ำ (Water vapour) เกิดการควบแน่นและกลั่นตัวเป็นฝนตามลำดับ



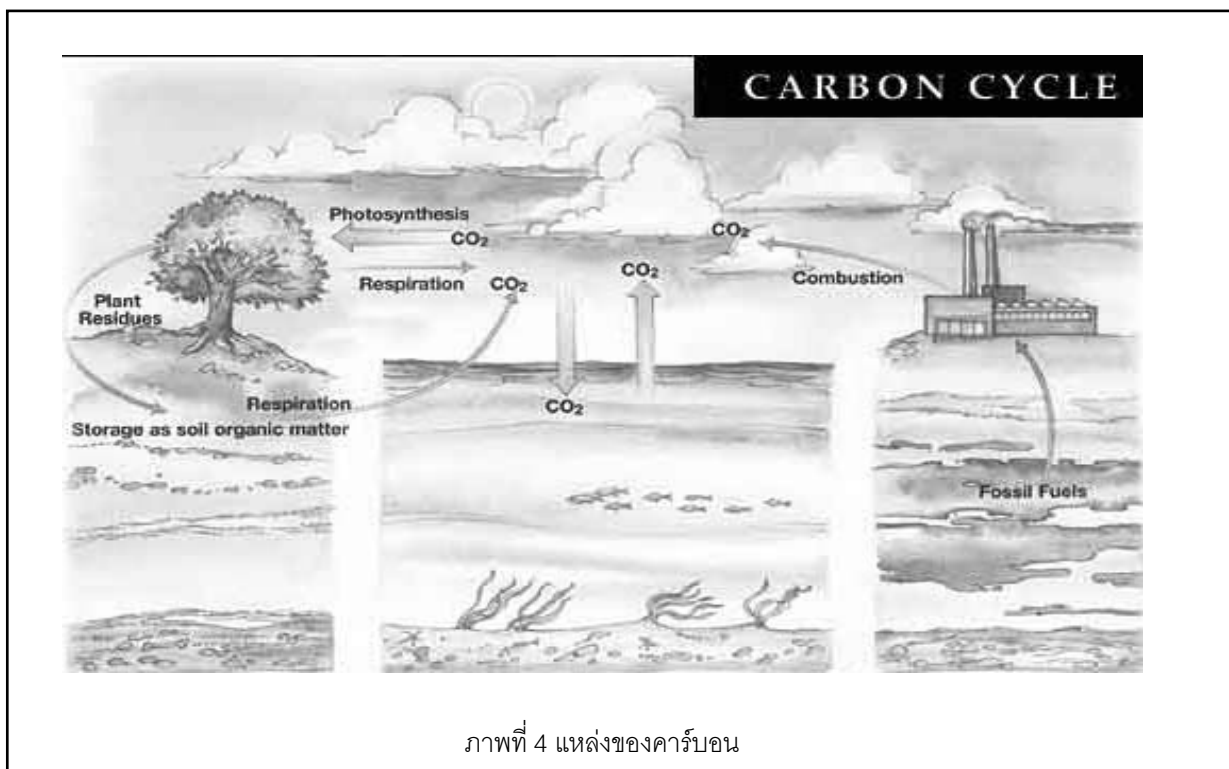
ภาพที่ 3 วัฏจักรของน้ำ

วัฏจักรคาร์บอน-ออกซิเจน (Carbon-Oxygen Cycle)

คาร์บอนเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของสิ่งมีชีวิต เป็นองค์ประกอบของสารพันธุกรรม เป็นองค์ประกอบของโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต สิ่งมีชีวิตได้รับคาร์บอนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกพืชได้รับคาร์บอนจากอากาศในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนั้นคาร์บอนบางส่วนอยู่ในรูปสารละลายกรดคาร์บอนิกแทรกซึมอยู่ในดิน ในน้ำมีคาร์บอน 3 รูปคือ CO_2 อีสาระ Bicarbonater และ Carbonate (พืชน้ำบางชนิดสามารถใช้ไบคาร์บอเนตจากแหล่งน้ำได้โดยตรงเช่น บัว สาหร่ายหางกระรอก สันตะวา) ผู้ผลิตจึงเป็นสิ่งมีชีวิตหลักที่ช่วยควบคุมปริมาณ CO_2 โดยเฉพาะผู้ผลิตในท้องทะเล CO_2 และน้ำถูกใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของผู้ผลิตนอกจากจะได้อาหารแล้วยังได้ O_2 ออกมาด้วยดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าวัฏจักรคาร์บอนและวัฏจักรออกซิเจนนั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด เป็นวัฏจักรที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบรักษาสสมดุล (Dynamic equilibrium) การหมุนเวียนคาร์บอนผ่านสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิตที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องแบบจัดเป็นวัฏจักรสั้นของคาร์บอน (Short term cycle)

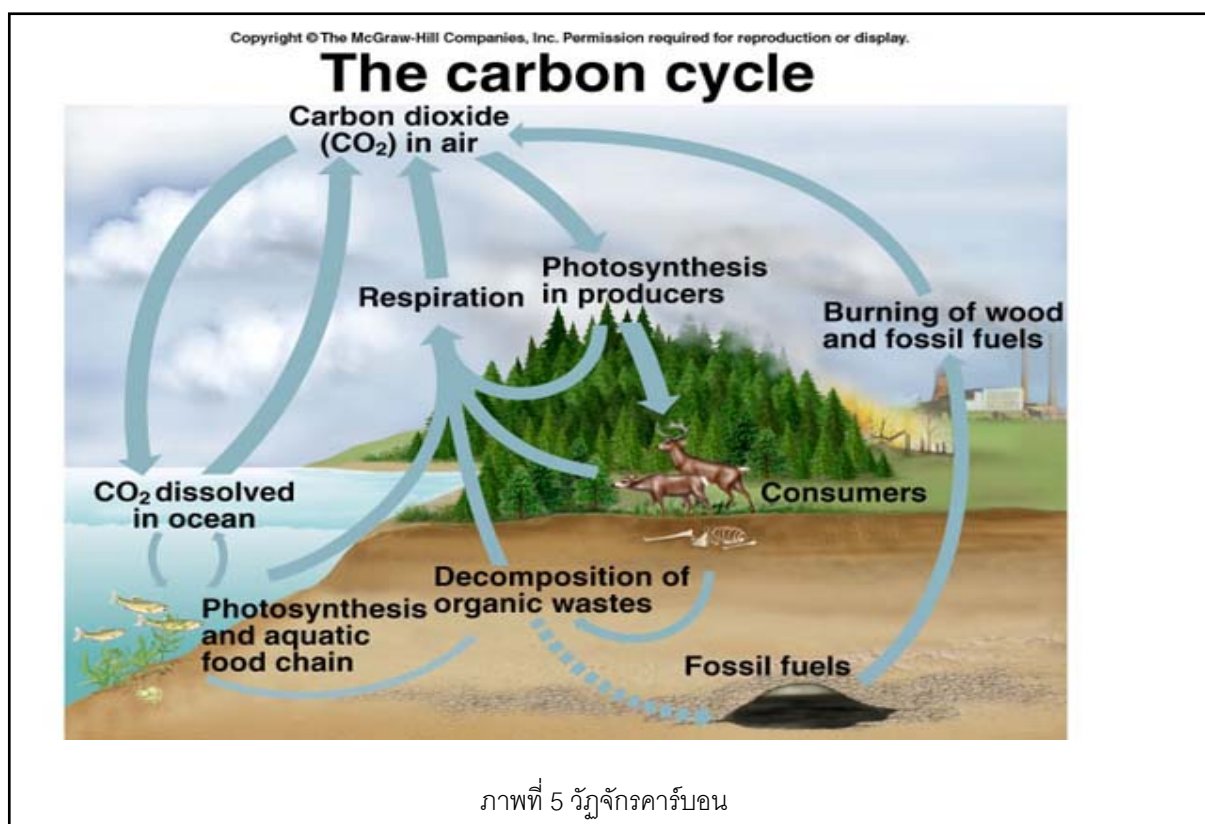
ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำทั่วไปมีประมาณ 0.5 มิลลิกรัมในน้ำ 1 ลิตร ที่ pH ต่ำหรือในสภาพความเป็นกรด ในน้ำคาร์บอนส่วนมากอยู่ในรูปก๊าซ CO_2 อีสาระ ซึ่งจะมีการหมุนเวียนกลับรูปที่เป็นสารละลายไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ที่ pH สูง แต่ถ้า pH ต่ำมันจะละลายอยู่ในรูปของคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) โดยทั่วไปน้ำทะเล 1 ลิตรที่ความเค็ม 35 ppt จะมีคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 46.8 มิลลิกรัม

นอกจากคาร์บอนที่หมุนเวียนอย่างต่อเนื่องในวัฏจักรแบบสั้นแล้ว คาร์บอนบางส่วนเกิดการทับถมในรูปการทับถมของเศษซากอินทรีย์ จุลินทรีย์บางอย่างทำให้เกิดการย่อยสลายเกิดเป็น CO_2 คืนสู่บรรยากาศบางส่วน แต่บางส่วนซึ่งจะถูกทับถมเป็นเวลานานหลายล้านปี และถูกความร้อน และแรงกดดันสูง ๆ จะแปรสภาพไปเป็นเชื้อเพลิง (Fossil fuel) เช่น ซากพืชที่ทับถมในแอ่งน้ำเป็นเวลานาน ๆ จะทำให้เกิดแอ่งฟิต ลำต้นของต้นไม้อาจแปรสภาพเป็นถ่านหิน การทับถมของใบไม้ อาจทำให้เกิดแก๊สธรรมชาติหรือน้ำมัน การตกตะกอนทับถมเศษซากแพลงตอนในท้องทะเลเป็นที่มาของแหล่งน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงดิน ฟ้าอากาศ หรือนุชนุ้ยน้ำขึ้นมาใช้จะเกิดการหมุนเวียนเข้าสู่สภาพ CO_2 ได้อีก ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเป็นวัฏจักรยาวของคาร์บอน



ภาพที่ 4 แหล่งของคาร์บอน

ในวัฏจักรคาร์บอนมีกระบวนการต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยมากมายเช่น การสังเคราะห์ด้วยแสง การหายใจ การบริโภค การเผาไหม้ การเผาหินปูน การถลุงของชาค การระเบิดของภูเขาไฟ การสลายสารอินทรีย์ และการสลายด้วยแสง ซึ่งหากพิจารณาโดยละเอียดสิ่งจำเป็นในกระบวนการเหล่านี้ไม่ใช่เพียงคาร์บอนเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับออกซิเจนอีกด้วย กระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้โลกมีปริมาณคาร์บอนเพียงพอต่อกิจกรรมของการมีชีวิตทั้ง ๆ ที่ผิวโลกมีอยู่เพียง 0.08% เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การเผาไหม้เชื้อเพลิงประมาณปีละ 5 พันล้านตัน และการเผาทำลายป่าอีก 1.5 พันล้านตัน ซึ่งทำให้ปริมาณของ CO_2 ในอากาศเพิ่มขึ้นและโลกก็ร้อนขึ้นเนื่องจากคลื่นความร้อน (ที่เปลี่ยนมาจาก UV) มีช่วงคลื่นสั้น (พลังงานน้อย) จึงไม่สามารถผ่านชั้นโอโซนและไอน้ำออกไปจากโลกได้เกิดเป็นปรากฏการณ์เรือนกระจก (Green house effect) ขึ้น ในช่วงเวลา 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมา มีการปลดปล่อย CO_2 เพิ่มขึ้นมากกว่า 10% หากเป็นเช่นนี้ต่อไปอีกประมาณ 500 ปีอุณหภูมิโลกจะเพิ่มขึ้น 22°C สภาพภูมิศาสตร์และภูมิอากาศจะเปลี่ยนแปลง น้ำแข็งขั้วโลกจะละลายทำให้ระดับน้ำสูงขึ้นจนทำลายพื้นที่เกษตรกรรม



สำหรับแก๊สออกซิเจนในอากาศจะมีอยู่ราว 20.95% ซึ่งมากเป็นอันดับสองรองจากแก๊สไนโตรเจน สามารถพบออกซิเจนได้ทั่วไปในโลก ในแหล่งน้ำก็มีออกซิเจนแตกต่างกันไปตามสภาพของแหล่งน้ำ และช่วงเวลา ปริมาณของออกซิเจน (DO : Dissolve Oxygen) ที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำต้องไม่ต่ำกว่า 4 มิลลิกรัม/ลิตร นอกจากค่า DO แล้วการศึกษาความสำคัญของออกซิเจนยังเกี่ยวข้องกับค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพ (BOD : Biological Oxygen Demand ในน้ำปกติควรมีไม่เกิน 1.5 มิลลิกรัม/ลิตร ถ้ามีถึง 12 มิลลิกรัม/ลิตรจะจัดเป็นน้ำเสีย) และค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD : Chemical Oxygen Demand ซึ่งเป็นปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารทุกชนิดโดยใช้วิธีทางเคมี โดยทั่วไปค่า COD จะสูงกว่าค่า BOD)

จากการศึกษาพบว่า การสังเคราะห์ด้วยแสงก่อให้เกิดออกซิเจน 400 ล้านตันต่อปี โดยได้จากพืชบกประมาณ 10% จากสาหร่ายและพืชทะเล 90%



วัฏจักรไนโตรเจน (Nitrogen Cycle)

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่สำคัญสำหรับชีวิตโดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโปรตีน พิวรีน (Purine) ไพริมิดีน (Pyrimidine) อากาศประกอบด้วยแก๊ส N_2 ประมาณ 78% โดยปริมาตรผู้ผลิตนำธาตุ N_2 ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน ผู้บริโภคได้รับธาตุไนโตรเจนโดยการบริโภคผู้ผลิตและผู้บริโภคด้วยกันตามระดับต่างๆ เมื่อผู้บริโภคขับถ่ายออกมาหรือตายลง ธาตุ N_2 ในรูปร่างต่างๆ ในซากศพและสิ่งขังถ่ายก็จะถูกตัวสลายสารอินทรีย์สลายออกมา กลับคืนออกมาสู่ดิน น้ำ และบรรยากาศ ตามขั้นตอนต่างๆ ของการย่อยสลายวัฏจักรไนโตรเจนเป็นวัฏจักรที่ซับซ้อนประกอบขึ้นจากหลายขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนแปลงสารรูปแบบต่างๆ โดยทั่วไปในหนึ่งวัฏจักรจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอนย่อยคือ

1. การตรึงไนโตรเจน (Nitrogen Fixation)
2. การสร้างแอมโมเนีย (Ammonification)
3. การสร้างไนเตรต (Nitrosification and Nitrification)
4. การผ่นกลับของไนเตรต (Denitrification)

ปฏิกิริยาในวัฏจักรไนโตรเจน

1. การตรึงไนโตรเจนในอากาศ (Nitrogen fixation) เป็นกระบวนการตรึงไนโตรเจนในอากาศเพื่อชดเชยการสูญเสียไนเตรตในดินเนื่องจากพืชดูดไปใช้ การพังทลายของดินหรือถูกน้ำชะล้าง และจากกระบวนการผ่นกลับ (Denitrification) มีความสำคัญต่อพืชและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เพราะเป็นกระบวนการเดียวที่ดึงไนโตรเจนจากอากาศมาเปลี่ยนให้เป็นไนเตรตซึ่งเป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ การตรึงไนโตรเจนเกิดขึ้นได้โดยกระบวนการสองอย่าง คือ

1.1 เกิดจากการกระทำของพวกจุลินทรีย์ (Biological fixation) สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 พวกคือ

ก. **Non-Symbiotic N-Fixation** เป็นกระบวนการตรึงไนโตรเจนของพวกจุลินทรีย์ที่ดำรงชีวิตอย่างอิสระ พลังงานที่ใช้ในการตรึงไนโตรเจนมาจากการสลายซากอินทรีย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่

- คลอสตริเดียม (Clostridium) เป็นแบคทีเรียพวกไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobes) อาศัยอยู่ในดิน
- อะซิโตแบคเตอร์ (Azotobacter) เป็นแบคทีเรียพวกใช้ออกซิเจนสามารถตรึงไนโตรเจนได้ดีกว่าพวกอื่นๆ
- สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว (Blue green algae) เช่น นอสตอค (Nostoc), อะนาบีน่า (Anabaena), กลีโอไตรเชีย (Gloeotrichia) และออสซิลลาทอเรีย (Oscillatoria) เป็นตัวตรึงไนโตรเจนในแหล่งน้ำ
- ยีสต์ สกูลโรโดโทรูลา (Rhodotorula)

ข. **Symbiotic N-Fixation** เป็นกระบวนการตรึงไนโตรเจนของพวกจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ร่วมกับพืช ได้แก่

- ไรโซเบียม (Rhizobium) เป็นพวกแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ที่รากของพืชตระกูลถั่วทำให้เกิดเป็นปม (Nodule) สามารถตรึง N_2 จากอากาศ แล้วเปลี่ยนรูปไปอยู่ในสภาพที่รากถั่วสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้
- ราไมคอร์ไรซา (Mycorrhiza) เป็นพวกราที่อาศัยที่รากของพืช เช่น สนสกุลไพน์ส สักทอง ประดู่ สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้

กระบวนการตรึงไนโตรเจนของสิ่งมีชีวิตที่ตรึงไนโตรเจนได้ต้องใช้เอนไซม์ชื่อ ไนโตรจีเนส (Nitrogenase) และพลังงานจำนวนหนึ่งไปทำลายพันธะสาม (Triple bond) ของโมเลกุลไนโตรเจน ($N \equiv N$) สารประกอบที่ได้ในกระบวนการนี้คือ แอมโมเนีย โดยมีเฟอร์โรดอกซินเป็นตัวรีดิวซ์ และใช้ ATP เป็นพลังงานในการขับเคลื่อนปฏิกิริยาในการขับเคลื่อนปฏิกิริยา

สำหรับปฏิกิริยารีดักชันของไนโตรเจนให้เป็นแอมโมเนียโดยวิธีทางอนินทรีย์เคมี เช่น Haber process จะใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวรีดิวซ์ ใช้ความกดดันสูงเป็นพลังงานขับเคลื่อน และมีตัวเร่งที่เหมาะสม ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมทำปุ๋ย NH_4NO_3 , $(NH_4)_2SO_4$ และ $(NH_4)_3PO_4$

1.2 เกิดจากปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ (Electrochemical and Photochemical fixation) ได้แก่ ฟาแลบ ฟาร์อง ฟาผ่า และการตกของอุกกาบาต เมื่อเกิดฟาแลบอุณหภูมิจากอากาศสูงขึ้น เกิดการรวมตัวของออกซิเจนและไนโตรเจน เมื่อฝนตกลงมาออกไซด์ของไนโตรเจนจะละลายน้ำ ได้เป็นสารละลายกรดอ่อน ๆ เกิดเป็นสารประกอบไนเตรตในดิน

จากการศึกษาของฮัทชินสัน (Hutchison) ค.ศ. 1944 พบว่า N_2 ในอากาศถูกตรึงโดยพวกแบคทีเรียและกระบวนการทางฟิสิกส์เคมีประมาณ 140-170 มิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อปี

2. การสร้างแอมโมเนีย (Ammonification) เป็นกระบวนการสร้างแอมโมเนียจากการสลายสิ่งขับถ่ายและซากอินทรีย์ต่างๆ โดยพวกแอมโมนิไฟอิง แบคทีเรีย (Ammonifying bacteria) เช่น *Bacillus* sp., *Proteus* sp., *Pseudomonas* sp. เป็นต้น กระบวนการนี้เกิดได้ทั้งในที่ที่มีหรือไม่มีออกซิเจน นอกจากนี้แอมโมเนียยังได้มาจากแหล่งอื่นๆ อีก เช่น การระเบิดภูเขาไฟ และกระบวนการไนเตรตรีดักชัน (Nitrate reduction)

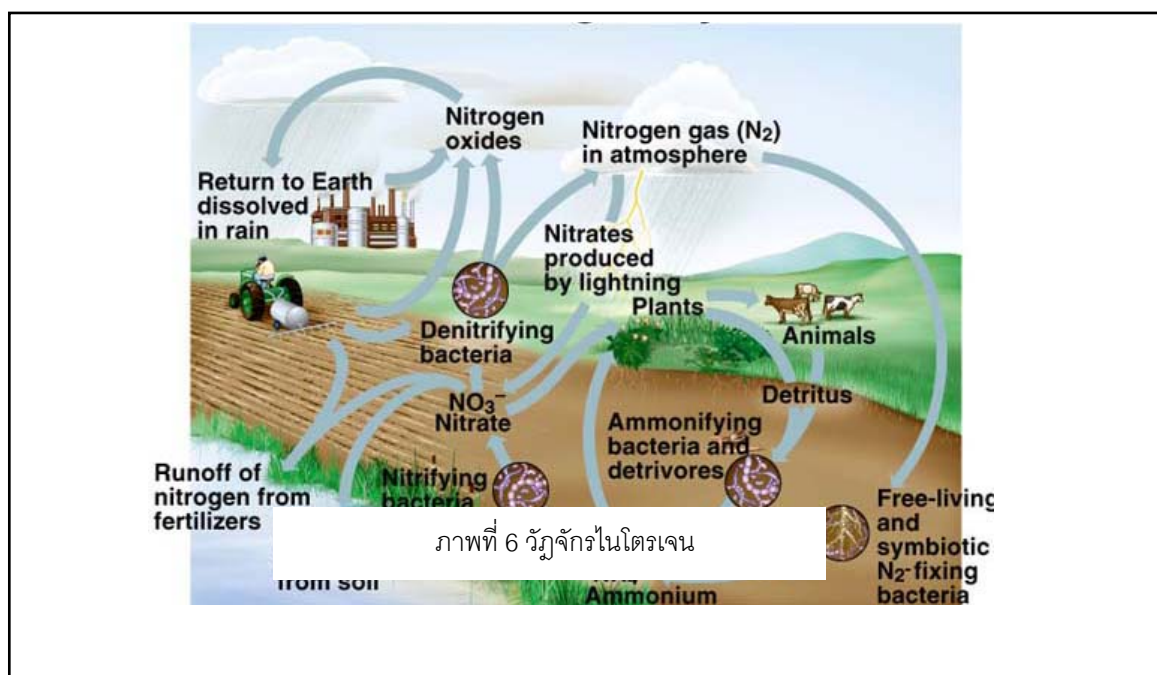
3. การสร้างไนเตรต (Nitrification) เป็นกระบวนการสร้างไนเตรต จากการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนีย โดยกระบวนการออกซิเดชันของพวกไนไตรไฟอิงแบคทีเรีย (Nitrifying bacteria) ตามขั้นตอนคือ

Ammonium – Nitrosomonas → Nitrite – Nitrobacter → Nitrate

การสร้างไนเตรตเป็นกระบวนการที่ให้พลังงาน นำไปสร้างอาหารได้ เรียกว่า การสังเคราะห์เคมี (Chemosynthesis) ดังนั้น ไนไตรโซโมนาสจึงเป็นพวกไนไตรแบคทีเรีย และไนโตรแบคเตอร์เป็นพวกไนเตรตแบคทีเรีย สามารถสร้างอาหารโดยใช้พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี

ไนเตรตไอออน (NO_3^-) มีประจุลบ จึงสามารถเคลื่อนย้ายไปมาอย่างอิสระในดินจนถึงระบบรากของพืชได้สะดวก รวมทั้งการถูกชะล้างลงไปยังดินชั้นล่างได้ง่ายและรวดเร็วจึงทำให้เกิดการสูญเสียธาตุอาหารของพืช และก่อให้เกิดปัญหาไนเตรตในน้ำ

4. การผันกลับของไนเตรต (Denitrification) เป็นกระบวนการผันกลับให้เกิดไนโตรเจนด้วยกระบวนการรีดักชัน โดยพวกดีไนไตรไฟอิงแบคทีเรีย (Denitrifying bacteria) เช่น ซูโดโมนาส (*Pseudomonas*), อะโครโมแบคเตอร์ (*Achromobacter*), บาซิลลัส (*Bacillus*), ไมโครคอคคัส (*Micrococcus*) เป็นต้น แบคทีเรียพวกนี้อาศัยอยู่ในดินส่วนลึก ๆ และในตะกอนที่ทับถมกันใต้แหล่งน้ำ อันเป็นที่มียูเรียและไนเตรต จึงใช้เกลือไนเตรตแทนออกซิเจนในกระบวนการหายใจ โดยวิธีนี้เกลือไนเตรตให้เป็นไนโตรเจน กลับเข้าสู่วัฏจักรใหม่ กระบวนการเหล่านี้ยังมีมากตามความอุดมสมบูรณ์ของดินก็จะลดลง แต่กระบวนการนี้เกิดได้ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน การพรวนดินให้ร่วนซุยทำให้มีออกซิเจนเพียงพอ กระบวนการนี้ก็จะไม่เกิด



มนุษย์เป็นต้นเหตุแห่งการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรไนโตรเจน จะเห็นได้ว่า ในช่วงเวลา 30 ปีมานี้ มีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ตัดไม้ทำลายป่า ปุ๋ยเคมีที่ผลิตขึ้นล้วนเป็นตัวการที่ทำให้ปริมาณแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า และการใช้สารเคมีชื่อ คลอโรฟลูโอโรคาร์บอนจากพวกเครื่องเย็น ตู้เย็น อุตสาหกรรมทำโฟม และกระป๋องสเปรย์ ทำให้ชั้นโอโซนซึ่งเปรียบเสมือนม่านบางเป็นเกาะคุ้มกันยังบางลงในชั้นสตราโตสเฟียร์ และเหนือทวีปแอนตาร์กติกาเกิดเป็นรูโหว่ขนาดเท่าประเทศสหรัฐอเมริกา ทำให้โลกของสิ่งมีชีวิตต้องได้รับความรุนแรงจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตและแสงจากดวงอาทิตย์ส่องผ่านเข้ามายังพื้นโลกได้มากขึ้น มีผลให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น ปริมาณฝนตกมากขึ้น (เพิ่มถึง 11 เปอร์เซ็นต์) อัตราการระเหยของน้ำรวดเร็วขึ้น ทำให้ผิวดินแห้งแตกกระแหงอันเป็นผลในการปลูกพืชได้รับความเสียหาย มนุษย์เป็นมะเร็งผิวหนังมากขึ้นและอาจมีผลกระทบต่อพืชและสัตว์หลายประการ

วัฏจักรของกำมะถัน (Sulfur cycle)

กำมะถัน เป็นธาตุที่จำเป็นธาตุหนึ่ง อยู่ภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิต เป็นองค์ประกอบอย่างหนึ่งของโปรตีนหลายชนิดที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ โดยเป็นตัวเชื่อมในสายพอลิเพปไทด์ ซึ่งเราพบในกรดอะมิโนซิสทีน (Cysteine) และ เมธิโอนีน (Methionine) จัดได้ว่าเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและกระบวนการเมแทบอลิซึมของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตในสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย อาจกล่าวได้ว่า ถ้าปราศจากกำมะถันแล้วไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้

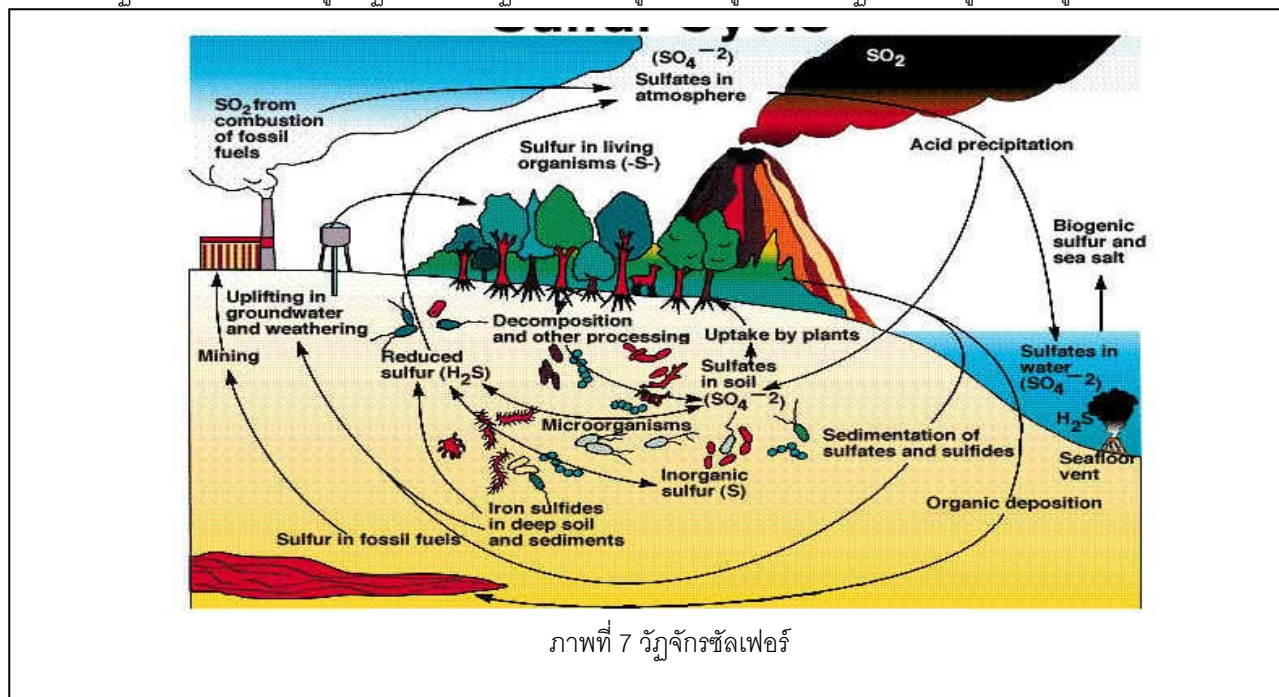
แหล่งกำมะถันที่สำคัญคือ สารประกอบอนินทรีย์ซัลเฟตซึ่งได้มาจากการเปลี่ยนแปลงย่อยสลายอินทรีย์สารหรือสิ่งขับถ่าย โดยการกระทำของราแอสเพอร์จิลลัส (Aspergillus) และรานิวโรสปอรา (Neurospora) เราเรียกกระบวนการที่ทำให้สารอินทรีย์กลับสลายเป็นสารอนินทรีย์นี้ว่า "Mineralization" กำมะถันที่พบโดยทั่วไป มักจะอยู่ในรูปสารประกอบต่างๆ เช่น

- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ได้จากการเผาไหม้ของโรงงานอุตสาหกรรมปลดปล่อยสู่บรรยากาศ มีผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์ (ถ้ามีในอากาศ 5 มก./ลิตร ทำให้หลอดลมตีบ หืด) แต่ปริมาณ SO_2 จะลดลง เนื่องจากการชะล้างของฝนลงในดินและน้ำ สัตว์น้ำก็จะได้รับสารประกอบกำมะถัน เมื่อตายลงก็ถูกย่อยสลายปลดปล่อยกำมะถันออกมา ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในธรรมชาติส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์กับไอโซน

- ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เกิดจากการลดออกซิเจนของสารอนินทรีย์ซัลเฟต โดยแบคทีเรียพวกไม่ใช้ออกซิเจน เช่น *Desulfovibrio desulfuricans*

- ซัลเฟต (SO_4) เป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ สะสมอยู่ในดิน ปุ๋ยที่มนุษย์ให้แก่พืชและจากการกระทำของพวกแบคทีเรียไม่มีสี และแบคทีเรียกำมะถันที่สังเคราะห์ด้วยแสงได้

วัฏจักรของกำมะถันมีอยู่ 2 วัฏจักร ได้แก่ วัฏจักรที่ไม่ผ่านผู้ผลิตและผู้บริโภคกับ วัฏจักรที่ผ่านผู้ผลิตและผู้บริโภค



ภาพที่ 7 วัฏจักรซัลเฟอร์

วัฏจักรฟอสฟอรัส (Phosphorus cycle)

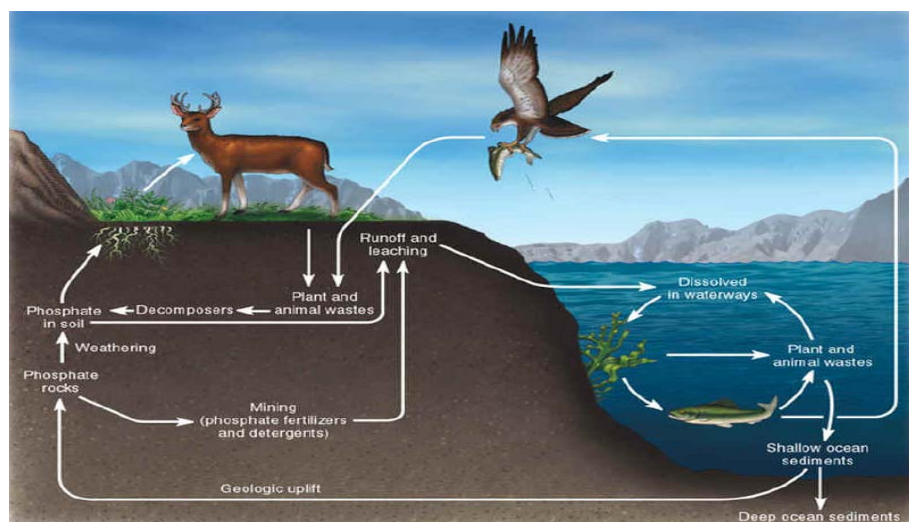
ฟอสฟอรัส เป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต เพราะเป็นองค์ประกอบของโพรโทพลาสมิกฟอสโฟลิพิด (Phospholipids), กรดนิวคลีอิก (Nucleic Acid), อะดีโนซีน ไตรฟอสเฟต (Adenosine Triphosphate; ATP) กรดฟอสโฟอินอลไพรูวิก (Phosphoenol Pyruvic Acid; PEP), NAD และ FAD มีบทบาทเกี่ยวกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต การถ่ายเทพลังงานและพันธุกรรม ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ จัดว่าเป็นปัจจัยจำกัด (Limiting factor) เพราะเกี่ยวข้องกับความสามารถของแหล่งน้ำ การเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ แหล่งสำรองของฟอสฟอรัสไม่ได้อยู่ในอากาศ แต่อยู่ในหินอัคนี หินตะกอน เป็นเวลานานนับล้าน ๆ ปี แล้วถูกทำให้ผุพัง (Weathering) โดยอิทธิพลของลม น้ำ และอื่นๆ สลายตัวลงสู่ดินและน้ำ ผู้ผลิตจะดูดเข้าไปในรูปของโมโนฟอสเฟตไอออน (H_2PO_4^-) ไดฟอสเฟตไอออน (HPO_4^{2-}) และส่วนน้อยในรูปฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน ผู้บริโภคได้รับฟอสฟอรัสจากการบริโภคผู้ผลิตในรูปสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบของโพรโทพลาสมิก เมื่อผู้บริโภคและพืชตายลงก็จะถูกย่อยสลายโดยฟอสฟาไทซิงแบคทีเรีย (Phosphatizing bacteria) ได้ออกมาในรูปฟอสเฟตที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้ ยังได้จากสิ่งขับถ่ายของสิ่งมีชีวิตหมุนเวียนกลับไปสู่ดินและน้ำ เพื่อเป็นสารอาหารของผู้ผลิตอีกครั้งหนึ่ง

พืชจะดูดฟอสฟอรัสได้น้อย ถ้าดินมีความเป็นกรดสูง (โดยทั่วไปดินมีความเป็นกรดเบส 2.2-9.6) เพราะฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของเหล็กฟอสเฟต หรืออลูมิเนียมฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ แต่ถ้าดินมีความเป็นเบสสูง พืชก็จะดูดฟอสฟอรัสได้น้อยเช่นเดียวกัน เพราะฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของแคลเซียมฟอสเฟตหรือแมกนีเซียมฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อย

ฟอสฟอรัสในน้ำส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟตเช่น ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate), ไพโรฟอสเฟต (Pyrophosphate), โพลีฟอสเฟต (Poly-phosphate), เมตาฟอสเฟต (Metaphosphate) และบางส่วนอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ อาจจะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรืออยู่ในรูปของซากพืช ซากสัตว์ ซึ่งมีที่มาจากแหล่งต่างๆ กัน จัดเป็น growth limiting nutrient ของแหล่งน้ำ ดังนั้นน้ำที่มีปริมาณฟอสเฟตปะปนอยู่มากจะทำให้พืชน้ำมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดปัญหาอื่นๆ ตามมาได้

ในแต่ละปีมนุษย์ใช้ปุ๋ยฟอสเฟตประมาณ 7×10^6 ตัน ทำให้มีผลต่อการหมุนเวียนของฟอสฟอรัสระหว่างบกกับทะเล มีผู้คำนวณปริมาณฟอสฟอรัสที่ไหลจากบกสู่ทะเลทางแม่น้ำ ล้างลงประมาณ 1.4×10^7 ตันต่อปี และจากทะเลขึ้นมานบกโดยการประมง มูลนกทะเล ประมาณ 1.0×10^5 ตันต่อปี ดังนั้นความอุดมสมบูรณ์ของพื้นดินย่อมลดลงไปเรื่อย ๆ เนื่องจากธาตุฟอสฟอรัสถูกพัดพาไปสู่ทะเลลึกปีละมากมาย

จะเห็นว่าวัฏจักรของฟอสฟอรัสเป็นวัฏจักรที่ไม่ซับซ้อน มีทิศทางเคลื่อนย้ายไปทางเดียว และแตกต่างจากวัฏจักรของสารอื่นๆ ตรงที่สารนี้ไม่มีการหมุนเวียนสู่บรรยากาศ เพราะไม่อยู่ในสถานะที่เป็นแก๊ส จึงเป็นวัฏจักรแบบที่มีการตกตะกอนของสาร (Sedimentary cycle) การหมุนเวียนของธาตุเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เพราะสารประกอบฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะล้างลงสู่ทะเลมหาสมุทร เกิดเป็นตะกอนหินฟอสเฟตค้างอยู่ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเวลานาน แต่ผู้บริโภคโดยเฉพาะนกทะเล มีบทบาทในการนำสารนี้กลับคืนสู่ผิวดินเข้าสู่วัฏจักรได้อีก นอกจากนี้ การนำหินฟอสเฟต (หินฟอสเฟตก็คือ แคลเซียมฟอสเฟต) มาบดเป็นปุ๋ยให้แกพืชจึงเป็นการเร่งวัฏจักรนี้ให้เร็วขึ้นและสมบูรณ์ขึ้น



ภาพที่ 8 วัฏจักรฟอสเฟต