

분뇨처리장 방류수를 정화하는 부들습지의 초기운영 단계에서 총인의 제거

양 홍 모¹⁾

¹⁾ 전남대학교 조경학과

Total Phosphorus Removal in Cattail Wetland Purifying Effluent from a Night Soil Treatment Plant during Its Initial Operation

Hongmo Yang¹⁾

¹⁾ Dept. of Landscape Architecture, Chonnam National University, Kwangju, 500-757.

ABSTRACT

Total phosphorus(TP) removal was examined in a surface-flow wetland constructed in April 2003 during its initial operating stage from June to November 2003. Its dimensions were 87mL by 14mW. It was a part of a four-wetland-cell treatment system constructed near the Kohung Estuarine Lake located in the southern part of Korea. Effluent from a night soil treatment plant was discharged into the wetland and purified effluent from the wetland was discharged into Sinyang Stream flowing into the Lake. Cattails(*Typha angustifolia*) from natural wetlands were cut at about 40 cm height and transplanted into the wetland. An average of 25.0m³/day of effluent flowed from the plant into the wetland. Water depth was maintained about 0.2m and hydraulic detention time was about 5.2 days. Average heights of the cattail stems in June and October 2003 were 47.2 and 164.6cm, respectively. The average number of stems was 10.2 stems/m² in June 2003 and 18.8 stems/m² in October 2003. Average temperature of influent and effluent ranged 23.4 and 24.2°C, respectively. The average TP concentrations of influent and effluent were about 1.31, 0.50mg/L, respectively. TP loading rate of influent into the wetland averaged 26.81mg/m², day and average TP loading rate of effluent was 10.04mg/m², day. Monthly average TP removal by the wetland during the warm growing season of cattails(June to September) ranged 16.28~19.57mg/m², day and during the cold senescent period (October to November) ranged 12.62~13.90mg/m², day. TP removal in the wetland continued during the cold winter months and was primarily done by sedimentation and precipitation of phosphorus rather than phosphorus absorption by cattails and microorganisms.

Key Words : *Surface flow, Sedimentation, Precipitation, Absorption, Adsorption.*

I. 서 론

자연습지가 가지고 있는 다양한 기능 중 수질 정화기능은 하천 및 호소의 수질개선에 중요한 역할을 한다는 사실은 오래 전부터 알려져 왔다. 자연정화기법인 인공습지는 생활하수 등 점원오염원을 정화하기 위해 활용되어 왔으며, 최근들어 2차처리장 방류수를 정화하기 위해서도 활용하고 있다. 인공습지 조성기술이 발전하면서 정화효율이 개선되어, 설계를 잘하고 합리적으로 운영할 경우 인공습지는 3차처리수준의 정화가 가능하다. 활성슬러지법 등 기존에 운영하고 있는 기계식 2차처리장을 3차처리수준으로 증설운영하는 데는 많은 비용이 소요되나, 인공습지를 활용하여 2차처리장 방류수를 정화할 경우 조성비용이 적게 들고 저렴한 비용으로 운영이 가능하다(Reed 등, 1995). 2차처리장 방류수를 정화하는 인공습지는 BOD(생물화학적산소요구량) 및 부유물 제거보다는 질소와 인을 제거하기 위해 주로 조성한다. 인공습지는 기계식 처리장에 비해 다양한 친환경적 기능을 제공하는 장점을 가지고 있다. 새등 야생동물의 서식처를 제공해주고, 시민휴식 및 자연학습 공간으로 활용할 수 있으며, 훼손된 습지의 복원과 정수식물의 성장으로 지역의 경관을 개선하는 역할을 할 수 있다(Kadlec and Knight, 1996; Mitsch and Gosselink, 2000; 양홍모, 1999).

수중에 함유되어 있는 질소와 인은 하천과 호소의 부영양화를 야기시키는 물질이며, 수질을 개선하기 위하여 질소와 인의 제거에 많은 노력을 기울이고 있다. 인공습지에서 인제거율은 질소제거율보다 상대적으로 낮은 경우가 있다. 습지에서 질소는 대기중으로 이동하는 양이 많고 이동성이 높은 반면, 인은 대기중으로 이동하는 양이 전혀 없고 이동성이 상대적으로 낮기 때문이다. 유입수에 함유되어 습지로 들어온 인은 침전되거나 식물에 흡수되어 습지 자체에 저장되며, 이런 저장작용으로 습지 유출수에 함유된 인의 농도가 낮아져 인이 제거된다. 습지의 인저장력이 낮을 경우 제거율이 낮아지는 경향을 보인다. 이러한 인제거기작의 특성에도 불구하고

고, 북미에서 운영중인 자유수면습지의 평균 인제거율은 약 57%로 인공습지의 인제거율은 상당수준에 달한다(Kadlec and Knight, 1996; EPA, 1999). 질소제거에 작용하는 미생물은 온도가 낮아지면 활동성이 둔화되어 겨울철에 질소제거율이 낮아지나, 온도의 영향을 덜 받는 인제거는 겨울철에도 가능하다.

수질정화습지의 인에 관한 연구는 질소에 관한 연구보다 상대적으로 적다. Richardson and Marshall(1986), Howard-Williams(1985) 등은 인저장 기작을 연구하였으며, Richardson and Craft(1993)는 인저장 개념모형으로 단기저장과 장기저장을 제시하였고, Kadlec(1994)은 TP제거와 습지바닥의 인퇴적에 관한 1차함수모형을 제시하였으며, 유출부가 유입부보다 인의 농도가 기하급수적으로 낮아짐을 관찰하였다. 습지의 인제거율(Kadlec and Wright, 1996, EPA, 1999)과 모형에 관한 연구는 대부분 북미수질정화습지 데이터베이스인 NADB(1993)를 기초로 연구되어 왔다. Richardson 등(1997)은 NADB 자료를 활용하여 인제거 예측모형을 제시하였으며, Kadlec(1999)은 인제거 한계를 분석하였다.

본 연구는 분뇨를 2차처리수준으로 처리하는 분뇨처리장의 방류수를 정화하기 위해 조성한 부들습지의 초기운영단계에서 TP(총인) 제거를 조사·분석하는데 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 실험습지 구조

전라남도 고흥군 고흥분뇨처리장 방류수의 전량(약 100m³/day)을 처리하면서, 2차처리장 방류수를 정화하는 습지시스템의 모형을 연구하기 위해 고흥담수호 주변의 간척개답지에 인공습지시스템을 조성하였다. 시스템의 유출수는 고흥담수호로 유입되는 신양천으로 방류된다. 본 실험습지는 시스템의 일부로 2003년 4월말에 조성이 완료되었다.

실험습지는 자유수면형 습지로 길이 87m, 폭 14m로 면적이 1,218m²이며, 분뇨처리장 방류수 약 25m³/day를 처리할 수 있도록 설계하였다. 독

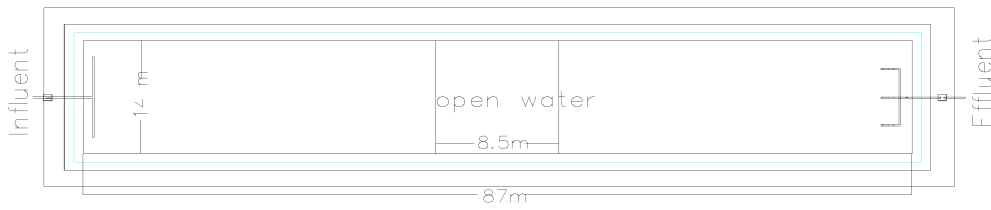


Figure 1. Schematic plan of the wetland purifying effluent from a secondary-level night soil treatment plant. No scale.

Table 1. Design parameters of the wetland.

Length(m)	Width(m)	Water depth (m)	Area (m ²)	Levee Height (m)	Porosity	Open water		
						Length(m)	Width(m)	Water depth(m)
87	14	0.2~0.3	1,218	1	0.65~0.75	14	8.5	1

의 높이는 습지바닥으로부터 1m이며, 독의 경사는 1 : 2로 조성하였다(Figure 1, Table 1), 유입량과 유출량을 조절할 수 있도록 유입부와 유출부에 밸브를 설치하였으며, 습지의 수심은 0.6m까지 조절할 수 있도록 조성하였다. 습지의 중앙에 정수식물이 성장할 수 없는 길이 14m 폭 8.5m의 개수부(open water)를 설치하였다. 개수부는 유입수의 단기이동을 완화하고 유입수가 정체되는 구역을 완화하는 역할을 한다. 실험 습지에는 주변에서 자생하고 있는 부들(*Typha angustifolia*)을 채취하여 뿌리에서 약 40cm 높이를 절단하여 약 30cm 간격으로 식재하였다.

2. 조사 및 분석 방법

시공 후 2003년 6월부터 6개월 간 실험습지의 유입수와 유출수를 조사 분석하였다. 유입수와 유출수를 7~10일에 한번씩 샘플링하여 환경부 수질오염공정시험방법(환경부, 2000)을 기준으로 미국공중보건협회(APHA, 1998)의 수질분석 방법을 참고하여 TP 등을 분석하였다. 수온은 현장에서 Scott pH-Meter(CG 347)로 측정하였다. 인공습지의 유입량 및 유출량은 매일 2~3회 유입부와 유출부에서 1분 동안 흐르는 양을 3회 받아서 평균 유입량 및 유출량을 산출하였다. 유입 및 유출수의 TP농도, 유입량 및 유출량, 습지면적 등을 기초로 습지의 초기운영단계 TP 제거량을 산출하였다.

식재한 부들의 생장조사는 1m×1m 격자 틀을

이용하여 초장과 분지수를 측정하였다. 조사지점은 습지의 유입부, 중앙 개수부 인접부, 유출부에서 각각 3군데씩 선정하였다. 분지수는 격자틀 내의 전수를 조사하였으며, 평균초장은 격자틀 내의 10개체를 3회 측정하여 평균값으로 나타냈다.

III. 결과 및 고찰

조사기간 실험습지의 평균유입량과 평균유출량은 각각 25.0, 24.3m³/day이었다. 식재한 부들의 초기활착을 유도하기 위해 습지의 수심을 0.2m로 유지시켰으며, 습지의 평균체류시간은 5.2 days였다. 북미에서 운영중인 수질정화 자유수면 습지의 평균체류시간은 약 7~10일 정도이다(Kadlec and Knight, 1996). Table 2는 2003년 4월 말 식재 후 2003년 6월, 8월, 10월에 조사한 부들의 초장과 분지수를 나타낸다. 6월에 평균초장 47.2cm가 8월에 95.5 cm로 성장하여 약 102% 증가하였으며, 10월에는 164.6cm로 성장하여 6월에 비해 249% 증가하였다. 평균 분지수는 식재 후 6월에 10.2 개/m²였으며, 8월에 17.2 개/m²로 69% 증가하였다. 10월에는 분지수가 18.8 개/m²로 6월에 비해 84% 증가하였다. 부들의 초장은 빠른 성장을 보인 반면, 분지수는 다소 느린 증가를 보였다. 부들의 초기 활착과 성장이 비교적 양호한 편이었다.

조사기간 유입수와 유출수의 평균수온은 각

Table 2. Growth of *Typha angustifolia* in the wetland from June to October 2003.

Date	Height (cm)	Stem (No./m ²)	Height increase between measurements (cm)	Stem increase between measurement (No./m ²)
2003.6.7. (a)	47.2	10.2	-	-
2003.8.9.	95.5	17.2	48.3 (102%)	7.0 (69%)
2003.10.11. (b)	164.6	18.8	72 (70%)	1.6 (9%)
Total increase (b-a)	117.4 (248%)	8.6 (84%)	-	-

(%) : % increase.

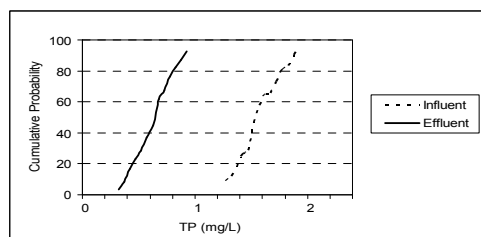
각 23.4, 24.2°C로 유출수가 0.8°C 높았다. 이는 부들이 활착단계로 습지수면에 그늘을 충분히 제공하지 못하여 수면일부에 햇빛이 도달한데 원인이 있는 것으로 판단된다. 6월~11월의 유출수의 월평균 수온은 각각 28.3, 29.1, 29.5, 26.9, 19.1, 12.2°C였다. 6월~8월은 수온이 완만하게 상승하였으며, 10월~11월은 수온이 큰 폭으로 내려가는 추세를 보였다.

조사기간 유입수와 유출수의 TP 평균농도는 각각 1.31, 0.50mg/L이었다 (Table 3). 유입수와 유출수의 TP 평균부하량은 각각 26.81, 10.04mg/m²·day였으며, TP 평균제거량은 16.77mg/m²·day였다. 제거량을 기준으로 실험습지의 TP 평균제거율은 약 63%였다. Figure 2는 유입수와 유출수의 TP농도 누적확률을 나타낸다. 유입수와 유출수의 TP농도범위는 각각 1.22~1.43, 0.43~0.55mg/L였으며, 유입수와 유출수의 TP농도 표준편차는 각각 0.07, 0.04mg/L였다. 유출수 TP농도가 유입수보다 변화가 적어 습지의 인제거가 어느 정도 안정되어 감을 알 수 있다.

습지에서 인의 저장은 조류(algae) 및 미생물의 흡수, 식물흡수, 토양흡착 및 인산염침강과 같은 단기저장과, 장기저장인 이탄퇴적(peat accretion)으로 구분할 수 있다(Richardson and Craft, 1993). 유입수에 함유되어 습지로 들어온 인은 조류와 미생물에 의해 흡수되거나(EPA, 2000), 습지토양

Table 3. Average hydraulic loading, TP removal for the wetland from June to November 2003.

Parameters	Units	Value
Approximate area	m ²	1,218
Inflow	m ³ /day	25.0
Outflow	m ³ /day	24.3
Inflow TP concentration	mg/L	1.31
Outflow TP concentration	mg/L	0.50
Inflow TP loading	mg/m ² ·day	26.81
Outflow TP loading	mg/m ² ·day	10.04
TP removal	mg/m ² ·day	16.77
TP removal rate by mass	%	63

**Figure 2.** Cumulative probability of influent and effluent TP concentrations for the wetland from June to November 2003.

에 흡착되며, 이온과 결합하여 인산염(Ca-phosphate, Fe-phosphate, Al-phosphate)의 상태로 습지바닥에 침강된다(EPA, 2000; 양홍모, 2003). 유기물에 흡착된 인은 유기물이 침전되면서 습지바닥에 침전된다. 식물뿌리에 의한 인의 흡수는 다른 단기저장에 비해 느리며, 식물, 조류(algae), 미생물의 생체량(biomass)이 증가하면 이들에 의한 단기저장이 증가할 수 있다. 죽은 조류와 미생물의 침전, 유기물의 침전, 토양에 흡착된 인, 침강된 인이 식물잔재물과 함께 습지바닥에 묻혀 이탄상태로 되어 인이 장기저장된다.

따라서 습지로 유입되는 인의 양이 장기저장능력의 범위를 넘어서지 않아야 유출수의 인제거가 지속적으로 가능하며, 습지의 장기저장능력은 약 1.0g/m²/year 정도로 보고있다(Richardson and Craft, 1993). 대기로부터 습지로 인의 유입, 유입수의 단기이동, 습지 내에서 일어나는 인의 흡수·흡착 및 용출의 순환작용 등으로 습지 유출수의 인 농도는 0mg/L에 도달할 수 없으며, 이

들 요인으로 인해 습지자체에서 발생하는 인의 농도(background concentration)를 0.01~0.05mg/L(Kadlec, 1999), 0.1mg/L 이하(EPA, 2000)로 제시하고 있다. 실험습지 유출수의 TP농도는 0.5mg/L로 제시된 습지자체에서 발생하는 TP 농도보다 높아 유입수에 함유된 인의 일부가 함유되어 있음을 알 수 있다.

미국 EPA(Environmental Protection Agency)는 NABD(1993)을 기초로 수질정화습지에 관련된 데이터베이스를 재구축하여 운영하고 있다(TWDB, 2000). 이중 온대권에 위치한 자유수면습지 시스템(Des Plaines, Illinois; Cobalt, Ontario; Listowel #3, Ontario; Houghton Lake, Michigan)의 TP 제거율은 약 54~97%이다(Table 4). 이들 시스템은 운영기간이 약 2~18년으로 길고, 부들(*Typha* spp.), 고랭이(*Scripus* spp.), 갈대(*Phragmites* spp.) 등의 정수식물의 성장이 안정된 시스템들이다. 새로 조성된 자유수면습지에 부들, 고랭이, 갈대를 약 0.3~0.6m 간격으로 식재하였을 경우 1년이 지나면 습지를 덮을 정도로 성장하며, 1회의 겨울철을 거치면 정수식물의 줄기와 잎이 죽어 습지바닥에 잔재물층이 형성된다(Reed 등, 1995). 본 실험습지는 식재한 부들이 성장단계로 습지를 덮을 정도로 충분히 자라지 못하였고, 잔재물층이 습지바닥에 형성되지 못한 초기운영단계였으나 TP 제거율 63%는 양호한 수준이다.

Table 4에서 Listowel #3의 유입수와 유출수의 TP 농도는 각각 1.27, 0.49mg/L이고, HRL은 2.41 cm/day로 실험습지와 유사하다. 실험습지 TP 제거율 63%는 Listowel #3의 TP 제거율 61%보다 약간 높다. Listowel #3은 길이가 334m, 폭이 3m로 길이 : 폭의 비가 111 : 1였으며, 유입부에서 유입수가 역류하는 현상이 관찰됐던 습지였다(EPA, 1999). 실험습지는 길이(87m) : 폭(14m)의 비가 6 : 1로 조사기간 유입수의 역류현상은 없었다.

Figure 3은 조사기간 TP 월평균제거량을 나타낸다. TP 월평균제거량은 6월8월에는 증가하다 9월~11월에는 감소하는 경향을 보였다. 6월~9월의 TP 월평균제거량은 각각 16.28, 18.20, 19.57, 17.40mg/m² · day였으며, 10월~11월의 TP

월평균제거량은 각각 13.90, 12.6mg/m² · day였다. 습지 수온이 높은 6월~9월(26.9~29.5℃)의 TP 월평균제거량은 수온이 낮은 10월~11월(12.2~19.1℃)의 월평균제거량보다 높았으며, 10월~11월의 TP 월평균제거량은 거의 비슷한 수준이었다. TP는 수온이 낮은 기간에도 습지에서 상당수준 제거됨을 알 수 있다.

습지에서 인은 유기물, 조류 및 미생물의 침전과 정수식물의 잔재물이 습지바닥에 쌓여 형성된 침전-잔재물층(sediment-litter layer)에 약 80~95%가 존재한다(Faulkner and Richardson, 1989; Richardson and Fact, 1993). 개수부 등에서 성장하는 녹조(algae)가 인을 흡수하여 인이 제거되며(Adey 등, 1993; DeBusk 등, 2003), 녹조가 죽어 습지바닥으로 침전하면 녹조에 흡수된 인이 습지바닥에 쌓이게 된다. 자유수면습지에서 정수식물이 흡수하는 인의 양은 5% 이하로 매우 적다(Faulkner and Richardson, 1989). 실험습지의 부들이 초기성장단계로 습지바닥에 잔재물층이 형성되지 않아 잔재물에 흡착되어 제거된 인의 양은 거의 없었을 것으로 생각되며, 개수부에서 성장한 녹조에 의한 인의 제거는 적은 양이었을 것으로 판단된다. 실험습지의 인제거는 유입수가 느린 유속으로 안정적으로 흘러 주로 침전과 침강에 의해 이루어졌을 것으로 판단된다.

Kadlec and Knight(1996)는 인공습지의 TP제거 공식을 1차함수면적모델(first order areal model)로 제시하였다(식 1 참조). 이 모형은 북미에서 운영중인 20여 개 수질정화습지의 유입수 및 유출수의 양과 유입수와 유출수의 TP농도를 기초로 작성하였으며, 인제거율 상수(rate constant)를 제시하였다. 식 1에서 유입수 및 유출수의 TP 농도, 수리학적 부하율을 활용하여 제거상수 값을 산출할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{C_o}{C_i}\right) = -\frac{k}{q} \dots\dots\dots (1)$$

- C_i = 유입수의 총인농도(g/m³)
- C_o = 유출수의 총인농도(g/m³)
- q = 수리학적 부하율(m/yr)
- k = 제거상수(m/yr)

Table 4. TP removal rates for surface-flow wetlands located temperate zone in North America.

Site	Area (ha)	Flow (m ³ /day)	Data Years	HLR (cm/day)	Emergent Plants	TP in (mg/L)	TP out (mg/L)	TP Removal (%)
Des Plaines, Illinois	2.4	1,876	7	4.55	<i>Typha</i> ssp. <i>Scripus</i> ssp.	0.10	0.02	80
Cobalt, Ontario	0.09	70	2	7.71	<i>Typha</i> ssp. <i>Scripus</i> ssp.	1.68	0.77	54
Listowel #3, Ontario	0.13	17	5	2.41	<i>Typha</i> ssp.	1.27	0.49	61
Houghton Lake, Michigan	4.0	360	18	0.44	<i>Typha</i> ssp. <i>Phragmites</i> ssp.	2.98	0.10	97

HLR : Hydraulic loading rate

Source : TWDB, 2000 (<http://www.epa.gov>)

북미에서 운영중인 20여 개의 습지 k 값은 2.4~23.7m/year이며, 평균 k 값은 12.1m/year이다. 실험습지의 k 값은 약 10.5m/year로 북미에서 운영중인 수질정화습지의 k 값의 범위에 있었다.

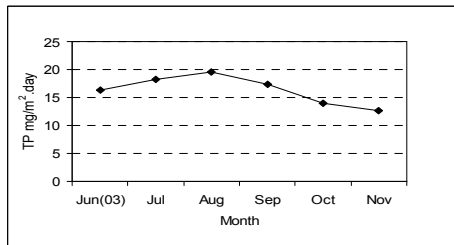


Figure 3. Monthly average TP removal by the wetland from June to November 2003.

IV. 결 론

조사기간 실험습지는 체류시간이 5.2 days, 수리학적부하율이 2.2cm/day로 유입수가 느린 유속으로 습지를 흘러, 유입수에 함유되어 습지로 들어온 인이 습지바닥에 침전·침강되는데 유리한 조건이었다. 운영초기로 습지 독에 식물이 충분히 자라지 않아 폭우시 독에서 습지바닥으로 토사가 일부 유입되는 현상을 제외하고는 실험습지는 정상적으로 운영되었다. 기온이 온난하고 부들이 성장하는 6월~9월의 실험습지 월평균 TP 제거량은 16.28~19.57mg/m²·day 범위였으며, 기온이 낮고 부들이 시드는 10월~11월의 월평균 TP 제거량은 12.62~13.90mg/m²·day 범위였다. 수온이 낮고 식물이 성장하지 않는 10월과 11월에도 TP가 상당수준 제거되었다.

조사기간의 실험습지 TP제거율 63%를 북미 온

대권에 위치한 자유수면습지의 TP 제거율(54~97%)과 비교하면 다소 낮은 범위에 속하나, 실험습지가 초기운영단계로 부들이 초기 성장단계였고 습지바닥에 침전-잔재물층이 충분히 형성되지 못한 점을 고려하면, 실험습지의 TP 평균제거율은 양호한 수준이었다. 본 연구는 습지조성 후 초기운영단계에서 TP의 제거를 6개월 간 조사분석하였다. 조성 1년 후 식재한 부들이 충분히 성장하여 생태적으로 안정된 조건에서 약 1년 간의 연구는 본 연구의 미비점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다. 실험결과 부들자유수면습지는 2차처리수준의 방류수에 함유되어 있는 인을 제거하는데 활용이 가능할 것으로 판단된다.

인 용 문 헌

- 양홍모. 1999. 수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리 인공 습지 및 연못-습지 시스템. 한국수자원학회지 32(5) : 111-113.
- 양홍모. 2003. 고수부지에 조성한 수질정화 여과 습지의 초기 운영단계 총인 제거. 한국환경복원녹화학회지 6(6) : 49-55.
- 환경부. 2000. 수질오염공정시험방법.
- Adey, W. H., C. Luckett. and K. Jensen. 1993. Phosphorus removal from natural waters using controlled algal production. Rest. Ecol. 1 : 2939.
- APHA(American Public Health Association). 1998. Standard method for the examination of water and wastewater.

- DeBusk, T. A., K. A. Grace, F. E. Dierberg., S. D. Kackson., M. J. Chimney and B. Gu. 2004. An investigation of the limits of phosphorous removal in wetlands : a mesocosm study of a shallow periphyton-dominated treatment system. *Eco. Eng.* 23(1) : 1-14.
- EPA(U.S. Environmental Protection Agency). 1999. Free water surface wetlands for wastewater treatment : a technology assessment.
- EPA(U.S. Environmental Protection Agency). 2000. Manual : constructed wetlands treatment of municipal wastewaters. Office of Research and Development. Cincinnati. Ohio.
- Faulkner, S. P. and C. J. Richardson. 1989. Physical and chemical characteristics of freshwater wetland soils(In Hammer. D. A. ed., "Constructed Wetlands for Wastewater Treatment : Municipal, Industrial and Agricultural"). Michigan : Lewis Publishers. Inc. Chelsea. pp. 41-72.
- Howard-Williams, C. 1985. Cycling and retention of nitrogen and phosphorus in wetlands : a theoretical and applied perspective. *Freshw. Biol.* 15 : 39-45.
- Kadlec, R. H. and R. L. Knight. 1996. Treatment wetlands. Boca Raton : CRC Press. Inc.
- Kadlec, R. H. 1994. Phosphorus uptake in Florida marshes. *Wat. Sci. Technol.* 30 : 225-234.
- Kadlec, R. H. 1999. The limits of phosphorus removal in wetlands. *Wetlands Ecol. Managmt.* 7 : 165-175.
- Mitsch, W. J. and J. G. Gosselink. 2000. Wetlands, 3rd ed. Van Nostrand Reinhold. New York.
- NADB(North American Treatment Wetland Database). 1993. U.S. Environmental Protection Agency.
- Reed, S. C., E. J. Middlebrooks. and R. W. Crites. 1995. Natural Systems for Waste Management and Treatment. McGraw-Hill, New York.
- Richardson, C. J. and P. E. Marshall. 1986. Process controlling movement, storage and export of phosphorus in a fen peatland. *Ecological Monographs* 56 : 279-302.
- Richardson, C. J. and C. B. Craft. 1993. Effective phosphorus retention in wetlands : fact or fiction?(In Moshiri, C.B. ed., "Constructed Wetlands for Water Quality Improvement"). Lewis Publishing Inc., Boca Raton, FL, pp. 271-282.
- Richardson, C. J., S. Qian., C. B. Craft. and R. G. Qualls. 1997. Predictive models for phosphorus retention in wetlands. *Wetlands Ecol. Managmt.* 4 : 159-175.
- TWDB(Treatment Wetland Database). 2000. U.S. Environmental Protection Agency, [http : //www.epa.gov](http://www.epa.gov)

接受 2004年 11月 15日