

분뇨처리장 방류수정화 갈대습지셀의 초기운영단계 질산성질소 제거

양 흥 모¹⁾

¹⁾ 전남대학교 조경학과

NO₃-N Removal of A Reed Wetland Cell Constructed for Purifying Effluent from A Night Soil Treatment Plant During Its Initial Operating Stage

Yang, Hongmo¹⁾

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

ABSTRACT

NO³-N removal was examined from July 2002 to December 2002 of a surface-flow constructed treatment wetland cell, which was a part of a treatment wetland system composed of four wetland cells and one distribution pond. The system was established on rice paddy near the Kohung Estuarine Lake located at the southern part of the Korean Peninsula. The lake and the paddy were formed by a salt marsh reclamation project. Effluent from a secondary-level treatment plant was funneled into the system. The investigated cell was created in June 2002. Its dimensions were 87 m in length and 14 m in width. It had an open water zone at its center, which was equivalent to 10 percent of its total area. Reeds(*Phragmites australis*) were transplanted from natural wetlands into the cell and their stems were cut at about 40 cm height from their bottom ends.

Average 25m³/day of effluent from the plant was funneled into the cell by gravity flow and average 24.2m³/day of its treated effluent was discharged into the Sinyang Stream flowing into the lake. Its water depth was maintained about 0.2 m and its hydraulic detention time averaged 5.2 days. The average height of the reed stems was 45.2 cm in July 2002 and 80.5 cm in September 2002. The number of stems averaged 40.3 stems/m² in July 2002 and 74.5 stems/m² in September 2002. The reeds were established initially well. NO₃-N loading rate of influent and effluent averaged 173.7 and 93.5mg/m² · day, respectively. Removal of NO₃-N averaged 80.2mg/m² · day and its removal rate by mass was about 50 %. Considering the initial operation of the cell and the inclusion of the cold months of November and December in the analysis period, the NO₃-N removal rate was good.

Key Words : surface flow, constructed wetlands, nitrification, denitrification,

* E-mail : hmy@chonnam.ac.kr

I. 서 론

인간 정주공간 주변의 자연습지가 수질을 정화하는 기능을 가지고 있다는 사실은 오래 전부터 알려져 왔다. 이런 자연습지의 정화기능을 활용하기 위해 인위적으로 조성한 습지를 수질 정화인공습지(treatment constructed wetlands) 혹은 인공습지(constructed wetlands)라 부른다. 1970년대부터 미국을 중심으로 서구 선진국에서 인공습지 조성 및 운영 기술이 개발되어 오고 있으며, 최근 국내에서도 수질정화를 위해 인공습지를 활용하는 방안에 관심이 높아지고 있다.

수질정화 인공습지는 자유수면형 습지와 지하흐름형 습지로 대별된다(Corbitt and Bowen, 1994; 양홍모, 1999). 북미에서는 자유수면형 습지를 상대적으로 많이 활용하고 있다. 자유수면형 습지는 절성토를 통하여 습지 둑을 조성한 후 습지바닥에 정수식물을 식재한다. 습지수심을 약 20~30cm로 유지시키며, 유입수가 느린 유속으로 습지를 흐르면서 정화된다. 수질정화 측면에서 1차처리수준(primary treatment level) 방류수를 2차처리수준(secondary treatment level)으로 정화하기 위해 조성한 습지를 일반적으로 인공습지라고 부른다. 이 경우 생물화학적 산소 요구량(BOD) 제거가 인공습지 조성의 일차적 목적이 된다. 북미에서는 자연정화 기법인 연못 시스템의 2차처리수준 방류수를 정화하기 위해 인공습지를 활용하고 있으며, 최근 들어 활성슬러지법 등 기계식 하수처리장의 2차처리수준 방류수를 3차처리수준(tertiary treatment level)으로 정화하기 위해 인공습지를 활용하고 있다. 2차처리수준 방류수를 3차처리수준으로 정화하는 인공습지를 향상습지(enhancement wetlands)라 칭하기도 한다(EPA, 2000). 향상습지는 주로 질소와 인을 제거하기 위해 활용하며, 수질정화 이외에 다양한 친환경적 기능을 제공하는 장점이 있다. 훼손된 습지를 복원하는데 활용이 가능하며, 야생동물의 서식공간을 제공할 수 있고, 자연학습 및 시민휴식 공간으로 활용이 가능하다. 북미에서는 향상습지를 조성할 때 이런

친환경적 기능을 고려하여 설계하는 추세이다. 인공습지에서 질소는 다양한 기작에 의해 제거된다. 유입수의 질소는 주로 암모니아화, 질산화, 탈질화로 제거되며, 습지식물의 흡수에 의해서도 제거된다(EPA, 1993; Mitsch and Gosselink, 1993; EPA, 1999; 양홍모, 2003). 습지에서 제거되는 질소의 양에서 탈질화로 제거되는 양이 약 60~70%에 달하며, 습지식물에 의한 흡수는 약 25%정도이다(Spiels and Mitsch, 2000). 습지식물에 의해서 흡수된 질소는 습지식물이 죽어 습지바닥에서 유기쇄설물로 전환되면 습지내의 물로 되돌아올 수 있으나, 탈질화로 질산성질소 (NO₃-N)가 질소가스로 전환되어 질소가스가 습지에서 대기 중으로 이동하면, 대기로 이동한 양만큼 습지시스템에서 질소가 제거된다. 탈질화가 인공습지의 질소제거에서 중요한 역할을 할 수 있으며, 최근 인공습지의 수질정화 기작에서 질산성질소 제거에 대한 연구에 관심이 높아지고 있다.

본 연구는 분뇨를 2차처리수준으로 처리하는 분뇨처리장의 방류수를 정화하는 갈대 습지셀(cell)의 초기운영단계 월평균 질산성질소 제거량을 조사·분석하는데 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 습지셀 구조

전라남도 고흥군 고흥 분뇨처리장 방류수의 전량을 처리하면서, 2차처리장 방류수를 정화하는 습지시스템의 모델을 연구하기 위해, 고흥 담수호 주변의 간척개답지에 인공습지 시스템을 조성하였다. 시스템의 유출수는 고흥 담수호로 유입되는 신양천으로 방류된다. 시스템은 습지셀 4개와 저류조 1개로 구성되어 있다. 저류조는 분뇨처리장 방류수를 각 습지셀로 분할 유입시키는 역할을 한다.

Figure 1은 본 연구에서 조사분석한 갈대 습지셀의 평면 및 단면 개념도이다. 실험 습지셀은 2002년 6월말에 조성이 완료되었으며, 자유

수면형 습지로 길이 87m, 폭 14m로 면적이 1,218 m²이다. 둑의 높이는 습지바닥으로부터 1m이며, 둑의 경사는 1 : 2로 설계하였다. 습지셀의 수심은 0.7m까지 조정할 수 있도록 조성하였다. 셀의 중앙에 정수식물이 성장할 수 없는 개수부(open water)를 설치하였다. 개수부는 길이 14m 폭 8.5m로 전체 셀 면적의 약 10%를 차지한다. 개수부는 유입수의 단기이동을 완화하고, 대기와 수면의 접촉으로 질산화가 촉진되어 정화효율을 증가시키는 역할을 한다. 습지셀에는 주변에서 자생하고 있는 갈대(*Phragmites australis*)를 채취하여 뿌리에서 약 40cm 높이를 절단하여 약 30cm 간격으로 식재하였다.

2. 조사 및 분석 방법

2002년 7월부터 12월까지 습지셀의 초기운영 단계 질산성질소 처리수준을 분석하였다. 유입수와 유출수를 7~10일에 한번씩 샘플링하여 환경부 수질오염공정시험방법(환경부, 2000)을 기준으로 미국공중보건협회(APHA, 1998)의 수질분석방법을 참고하여 NO₃-N, T-N 등을 분석하였다. 수온과 pH는 현장에서 Scott pH-Meter (CG 347)로 측정하였다. 인공습지의 유입량 및 유출량은 매월 1~2회 유입부와 유출부에서 1분 동안 흐르는 양을 3회 받아서 평균 유입량 및 유출량을 산출하였다.

인공습지의 오염물 처리정도를 흔히 %농도로 나타내고 있다. 유입수의 오염물 10mg/L가 습지에서 1mg/L로 처리된 경우와 유입수의 오염물 100mg/L가 습지에서 10mg/L로 처리된 경우 농도처리율은 다 같이 90%이다. 유입수 및 유출수의 오염물 농도, 유입수와 유출수의 양, 습지면적을 기준으로 단위시간당, 단위면적당 제거량으로 나타내면 이를 처리율은 달라진다. 단위면적당, 단위시간당 처리율로 나타내는 것이 농도처리율보다 합리적이다. 본 연구에서는 유입 및 유출수의 NO₃-N의 농도, 유입량 및 유출량, 습지면적 등을 기초로 습지셀의 초기운영단계 NO₃-N 제거율을 산출하였다.

식재한 갈대의 생장조사는 1m×1m 격자 틀을 이용하여 초장과 분지수를 측정하였다. 조사지점은 시스템의 유입부, 중앙 개수부 인접부, 유출부에서 각각 3군데씩 설정하였다. 분지수는 격자를 내의 전수를 조사하였으며, 평균초장은 격자를 내의 10개체를 3회 측정하여 평균값으로 나타냈다.

III. 결과 및 고찰

조사기간 유입수의 평균유량은 25m³/day이었다. 식재한 갈대의 활착을 유도하기 위해 수심을 0.2m로 유지시켰으며, 습지셀의 평균체류시

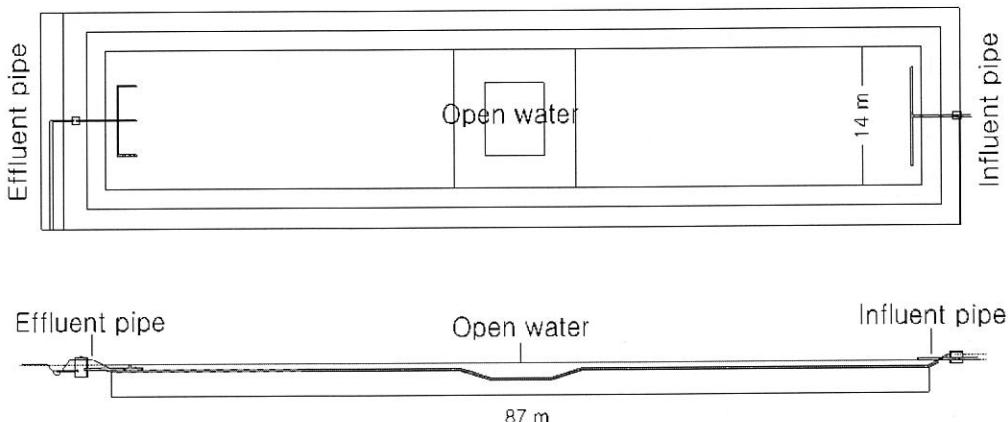


Figure 1. Schematic plan and section of the wetland cell constructed for treatment of effluent from a secondary-level treatment plant.

간은 5.2days였다. 북미에서 운영중인 수질정화 자유수면형 습지의 평균체류시간은 7~10일 정도이다(Kadlec and Knight. 1996). Table 1은 2002년 6월 말 식재 후 2002년 7월, 9월, 11월에 조사한 갈대의 초장과 분지수를 나타낸다. 7월에 평균초장 45.2cm가 9월에 80.5cm로 성장하여 약 78% 성장율을 보였다. 갈대의 초장은 9월까지 성장을 계속하다가, 10월 중순부터 기온이 낮아지면서 줄기가 마르기 시작하여 초장이 감소하는 경향을 보였다. 평균 분지수는 식재 후 7월에 40.3개/m²였으며, 9월에 74.5개/m²로 85%의 증가를 보였다. 7월~8월에는 분지수가 증가하다가, 9월~10월에는 분지수의 증가가 둔화되었으며, 11월에는 분지수의 증가가 나타나지 않았다. 식재한 갈대의 활착과 성장이 비교적 양호한 편이었다.

Figure 2는 조사기간 유입수와 유출수의 월평균 수온을 나타낸다. 조사기간 유입수와 유출수의 평균수온은 각각 19.7°C, 20.6°C로 유출수가 0.9°C 높았다. 7월과 9월에는 유출수의 수온이 유입수보다 높게 나타났다. 7월, 8월, 9월, 10월의 유출수의 월평균 수온은 각각 31.0°C, 25.0°C, 31.3°C, 17.7°C이었으며, 11월과 12월의 유출수의 월평균 수온은 각각 12.2°C, 8.1°C였다. Figure 3은 유입수와 유출수의 월평균 pH를 나타낸다. 조사기간 유입수와 유출수의 평균 pH는 각각 6.2, 8.2이었으며, 유출수의 pH가 유입수보다 높게 나타났다. 유출수의 pH는 7월~10월에 증가 추세를 보이다가, 11월~12월은 감소 추세를 나타냈다.

Table 2에서 조사기간 유입수와 유출수의 평균 NO₃-N 농도는 각각 8.5, 4.7 mg/L이었다. 유

Table 2. Average hydraulic loading, NO₃-N and T-N removal for the wetland cell from July through December 2002.

Parameters	Units	Value
Approximate area	m ²	1,218
Inflow	m ³ /day	25.0
Outflow	m ³ /day	24.2
Inflow NO ₃ -N concentration	mg/L	8.5
Outflow NO ₃ -N concentration	mg/L	4.7
Inflow NO ₃ -N loading	mg/m ² · day	173.7
Outflow NO ₃ -N loading	mg/m ² · day	93.5
NO ₃ -N removal	mg/m ² · day	80.2
NO ₃ -N removal rate by mass	%	50
Inflow T-N concentration	mg/L	26.1
Outflow T-N concentration	mg/L	10.4
Inflow T-N loading	mg/m ² · day	534.8
Outflow T-N loading	mg/m ² · day	207.1
T-N removal	mg/m ² · day	327.7
T-N removal rate by mass	%	60

입수와 유출수의 NO₃-N 평균부하율은 각각 173.7, 93.5 mg/m² · day로 NO₃-N 평균제거량은 80.2 mg/m² · day였다. 제거량을 기준으로 습지 셀의 NO₃-N 평균 제거율은 약 50%였다. 유입수와 유출수의 평균 T-N 농도는 각각 26.1, 10.4 mg/L이었으며, 유입수와 유출수의 T-N 평균부하율은 각각 534.8, 207.1 mg/m² · day로, T-N 평균 제거량은 327.7 mg/m² · day였다. 제거량을 기준으로 시스템의 T-N 평균제거율은 약 60%였다.

Figure 4에서 조사기간 월평균 NO₃-N 제거량은 7월에 87.6 mg/m² · day였으며, 8월에 93.9 mg/m² · day로 증가했다가 9월부터 점점 낮아져

Table 1. Growth of *Phragmites australis*.

Plant Species	2002.7.15 (a)		2002.9.14 (b)		2002.11.11 (c)		Relative increase (b-a)		Relative increase (c-a)	
	Height (cm)	Stem (No./m ²)	Height (cm)	Stem (No./m ²)	Height (cm)	Stem (No./m ²)	Height (cm)	Stem (No./m ²)	Height (cm)	Stem (No./m ²)
Phragmites australis	45.2	40.3	80.5	74.5	87.4	82.4	35.3 (78%)	34.2 (85%)	42.2 (93%)	42.21 (104%)

(%): % increase rate

12월에 $62.9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 를 보였다. Figure 5에서 조사기간 월평균 T-N 제거량은 7월에 $336.3 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 였으며, 8월과 9월에 각각 $361.3, 366.1 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 증가했다가 10월부터 점점 낮아져, 12월에 $261.7 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 를 보였다.

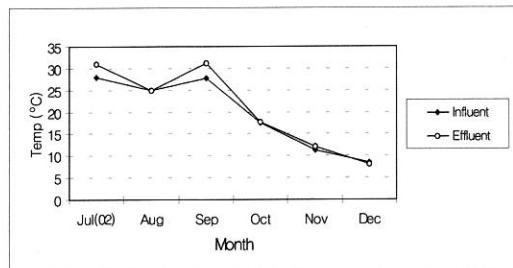


Figure 2. Monthly average temperature of influent and effluent.

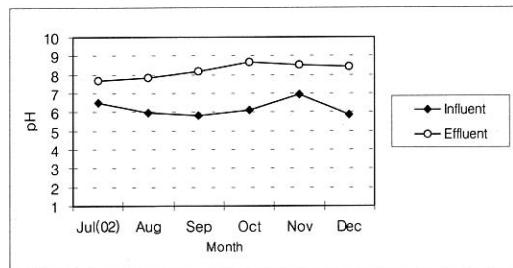


Figure 3. Monthly average pH of influent and effluent.

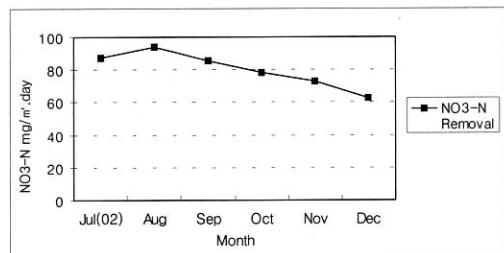


Figure 4. Monthly average NO₃-N removal.

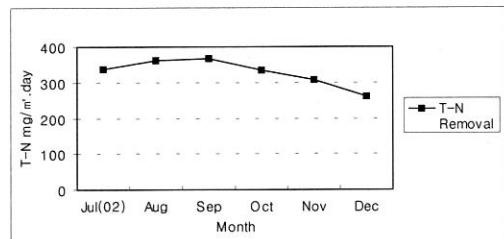


Figure 5. Monthly average T-N removal

인공습지에서 유입수의 유기질소(organic N)는 암모니아화와 질산화 과정을 거쳐 질산성질소(NO₃-N)로 전환되며, 질산성질소는 탈질화 과정을 거쳐 질소가스(N₂)와 아산화질소(N₂O)로 전환되어 대기중으로 이동한다(Reed *et al.*, 1988; Faulkner and Richardson 1989). 유입수의 질소 중 NO₃-N이 차지하는 비율이 높을수록 질소제거율이 높아지는 경향을 보이며, NO₃-N의 제거량으로 습지의 탈질화 정도를 간접적으로 알 수 있다(Bachand and Horne, 2000). 인공습지의 NO₃-N 제거량은 $6\sim4,000 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 제거량 범위가 넓다(Bachand and Horne, 2000). NO₃-N 제거량이 높은 습지들은 대부분 시공 후 수년이 지나 정수식물의 성장과 균权발달이 양호하고, 습지바닥의 잔재물층 형성이 양호하며, 생태적으로 안정된 시스템들이다. 실험 습지셀의 NO³-N 제거량은 다소 낮은 범위에 속한다.

습지에서 미생물 활동에 의한 오염물의 제거는 수온의 영향을 받게 된다. 암모니아의 질산화와 질산성질소의 탈질화는 $20\sim25^\circ\text{C}$ 에서 높으며, 15°C 이하와 30°C 이상에서는 둔화된다. 따라서 $20\sim25^\circ\text{C}$ 의 수온에서 습지의 질소 제거량이 상대적으로 높아진다. 조사기간 실험습지의 NO₃-N 제거량이 낮은 이유는 11월~12월의 습지 수온이 낮았던 터 원인이 있는 것으로 사료된다.

탈질화 과정은 전자를 공급하는 유기탄소원이 필요하며(EPA, 1993), 습지식물이 죽어 형성된 잔재물과 유기쇄설물이 탄소공급원 역할을 한다(Broadbent and Clark, 1965). 탄소공급원이 원활하지 못하면 NO₃-N 제거량이 낮아지게 된다(Zhu and Sikora, 1994). 실험기간 습지셀은 갈대가 초기성장단계로 습지바닥에 잔재물층이 형성되지 못한 상태였다. 겨울철에 갈대의 잎과 줄기가 죽어 습지바닥에 이들의 일부가 쌓여 잔재물층이 형성되려면 약 2~3년이 소요된다. 실험습지의 NO₃-N 제거량이 낮은 원인은 습지바닥에 잔재물층이 형성되지 않아 탈질화에 필요 한 탄소공급원이 원활히 제공되지 못한데도 있는 것으로 생각된다.

습지에서 성장하는 정수식물은 통기조직이 발달하여 대기중의 산소를 뿌리로 전달할 수 있

으며, 산소가 뿌리로 도달하면 뿌리주변에 호기성 균권이 형성된다. 호기성 균권에서는 암모니아화와 질산화가 일어나며, 균권 밖의 혼기층에서는 질산성질소가 질소가스와 아산화질소로 전환된다. 조사기간 식재한 갈대가 초기 활착단계로 균권의 발달이 원활하지 못하여 $\text{NO}_3\text{-N}$ 처리율이 다소 낮게 나타난 것으로 사료된다.

인공습지에서 질소제거는 침전(sedimentation), 여과(filtration), 흡착(adsorption)에 의해서도 이루어진다(EPA, 2000; 양홍모, 2002). 유입수가 느린 유속으로 이동하는 동안 직경이 큰 유기질소 입자들은 습지바닥으로 침전되며, 습지바닥의 잔재물층은 유기질소 입자를 여과하여 제거하는 역할을 한다. 수중의 식물줄기와 잔재물의 표면에는 미생물막(biofilm)이 형성되며, 유기질소 입자들이 미생물막에 흡착되어 제거된다. 실험기간 시스템의 체류시간이 5.2 days로 침전에 의한 유기질소의 제거가 가능한 조건이었다. 수중의 갈대줄기에 형성된 미생물막은 질소제거에 기여하였을 것으로 생각되나, 습지바닥에 잔재물이 형성되지 않아 여과작용으로 제거된 질소는 낮은 수준이라고 생각된다.

Figure 2에서 7월~10월의 월평균 수온은 미생물의 활동이 질소제거에 비교적 적합한 조건이었으며, 11월~12월의 월평균 수온은 12.2~8.1°C 범위로 미생물의 활동이 낮은 조건이었다. Figure 5에서 7월~10월의 T-N 처리율이 높고, 11월~12월의 T-N 제거량이 낮은 이유는 습지의 수온에 일차적 원인이 있는 것으로 사료된다.

IV. 결 론

조사기간 실험습지의 처리수 평균수온은 20.9°C였고, 평균 pH는 8.1이었다. 식재한 갈대는 7월에 평균초장 45.2cm에서 9월에 80.5cm로 성장하여 약 78% 증가를 보였으며, 평균 분지수는 7월에 40.3개/ m^2 에서 9월에 74.5 개/ m^2 로 증가하여 약 85% 증가를 보였다. 식재한 갈대의 활착과 성장이 비교적 양호한 편이었다.

조사기간 유입수와 유출수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 평균부

하량은 각각 173.7, 93.5 $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 이었으며, $\text{NO}_3\text{-N}$ 평균제거량은 80.2 $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 약 50%의 제거율을 보였다. 유입수와 유출수의 T-N 평균부하량은 각각 534.8, 207.1 $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 이었으며, T-N 평균제거량은 327.7 $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 약 60%의 제거율을 보였다. 실험 습지셀이 초기운영단계이고 수온이 낮은 11월과 12월이 조사기간에 포함된 점을 고려하면 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 T-N 제거량은 비교적 양호한 편이다. 본 연구에서는 인공습지 셀의 질산성질소 제거량을 조사분석하였다. 인공습지의 질산성질소 제거기작을 이해하기 위해서는 질산성질소 제거에 영향을 미치는 중요 변수에 관한 후속 연구가 필요하다고 사료된다.

V. 인 용 문 현

- 양홍모. 1999. 수자원보전을 위한 점원 및 비점원 오염물의 자연생태적 친환경적 처리 인공습지 및 연못-습지 시스템. 한국수자원학회지 32(5) : 111-113.
- 양홍모. 2002. 하천수정화 근자연형 인공습지의 초기 질소제거. 한국환경농학회지 21(4) : 269-273.
- 양홍모. 2003. 고수부지에 조성한 수질정화 자유수면습지의 초기 운영단계 질소제거. 한국환경복원녹화학회지 6(6) : 41-48.
- 환경부. 2000. 수질오염공정시험방법.
- APHA(American Public Health Association). 1998. Standard method for the examination of water and wastewater.
- Bachand, P. A. M. and A. J. Horne. 2000. Denitrification in constructed free-water surface wetlands I: very high nitrate removal rates in a macrocosm study, Ecol. Eng. 14, 9-15.
- Broadbent, F. E. and F. E. Clark. 1965. Denitrification. Agronomy 10 : 344.
- Corbitt, R. A. and P. T. Bowen. 1994. Constructed wetlands for wastewater treatment (In Kent, D. M. eds., Applied Wetlands science and technology) Publishers Lewis. pp. 221-241.

- EPA(U.S. Environmental Protection Agency). 1993. Manual-Nitrogen control. Office of Research and Development. Washington, D.C.
- EPA(U.S. Environmental Protection Agency). 1999. Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment. pp. 4-14 - 4-21.
- EPA(U.S. Environmental Protection Agency). 2000. Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio. pp.30-48
- Faulker, S. P. and C. J. Richardson. 1989. Physical and Chemical Characteristics of Freshwater Wetland Soils(In Hammer, D. A. eds., Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural) Lewis Publishers, Inc. Chelsea, Michigan. pp.41-72.
- Mitsch, W. J. and J. G. Gosselink. 1993. Wetlands, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Kadlec, R. H. and R. L. Knight. 1996. Treatment Wetlands. CRC Press, Inc. Boca Raton. pp. 717-737.
- Reed, S. C. · E. J. Middlebrooks and R. W. Crites. 1988. Natural Systems for Waste Management and Treatment. McGraw-Hill, New York.
- Spiels, D. J. and W. J. Mitsch. 2000. The effects of seasons and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in constructed wetlands : a comparison of low-and high-nutrient riverine systems. Eco. Eng. 14: 77-91.
- Zhu, T. and F. J. Sikora. 1994. Ammonium and nitrate removal in vegetated and unvegetated gravel bed microcosm wetlands(In Proc. 4th Int. Conf. on Wetland Systems for Water Pollution Control) Guangzhou. China. pp. 355-366.

接受 2004年 8月 10日