

지하수위와 연계된 습지 식생의 비선형 동역학

이옥정·김상단**

부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

*부경대학교 환경공학과 교수

Non-linear dynamics of wetland vegetation induced by groundwater table

Okjeong Lee·Sangdan Kim**

Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University

**Department of Environmental Engineering, 45, Pukyong National University*

(Received : 19 April 2019, Revised: 12 May 2019, Accepted: 12 May 2019)

요약

식생과 지하수위 사이의 양방향 상호 작용은 습지 식생의 동역학에 많은 영향을 미친다. 본 연구에서는 지하수위에 의해 영향을 받는 습지 식생의 비선형 동역학이 분석된다. 지하수위에 대한 영향은 습지 식생의 지배방정식에서 손실 항으로 설명되며, 지하수위 변화에 따라서 습지 식생이 어떻게 서로 다른 두 개의 안정적인 상태로 수렴될 가능성이 있게 되는지를 살펴보게 된다. 이러한 개념적 접근법으로부터 지하수위 변화에 따라 현재 습지에 존재하는 식생이 소멸되어 다른 식생 종으로 안정화되는 대변환에 대한 취약성이 분석된다.

핵심용어 : 지하수위, 비선형 동역학, 습지식생

Abstract

Bi-directional interaction between vegetation and groundwater table has a great influence on the dynamics of wetland vegetation. In this study, nonlinear dynamics of wetland vegetation affected by groundwater are analyzed. The effect on groundwater is described as a loss term in the governing equation of wetland vegetation and it is explored how the wetland vegetation is likely to converge into two attractors by groundwater table change. From this conceptual approach, the vulnerability to catastrophic shifts in stable state where the current vegetation species are extinct and stabilized by other vegetation species is analyzed in response to groundwater table.

Key words : groundwater table, non-linear dynamics, wetland vegetation

1. 서 론

습지는 육상 생태계와 수중 생태계 사이의 전이 영역으로 (Naiman et al., 2010), 식생에 의하여 물 순환, 영양물질 순환, 홍수 저감, 수질 정화, 지하수 재충전 등을 포함한 중요한 생태계 서비스를 제공한다(Meek et al., 2010). 식생의 발생, 성장, 소멸을 포함한 습지 식생의 동역학은 자연적 또는 인위적 간섭에 기인하는 지하수위의 변화에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Gurnell et al., 2012).

습지 식생에 미치는 지하수위의 영향은 지하수위 상승에 따른 물고임에 의한 식생 고사(Friedman and Auble, 1999) 또는 지나친 지하수위 저하(Loheide and Booth, 2011)로 요약될 수 있다. 이 때, 지하수위는 지표면에서 지하수면까지의 깊이를 의미한다. 식생의 외부 스트레스에 대한 시간 지연 반응과 관련하여

식생 활력의 전반적인 감소는 지하수위가 일부 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 물 잠김에 의한 스트레스에 노출된 식생은 뿌리 고사 또는 광합성 활동의 감소, 식생의 성장 및 번식과 관련된 장단기적인 생리화학적 또는 형태학적인 반응을 하게 된다. 지하수위에 대한 식생의 민감도와 관련된 연구들을 살펴보면 (Lite et al., 2005), 일반적으로 지하수위는 특정 식물 종의 개체 성장에 영향을 주는 기본적인 변수로 간주되어 토양수분, 영양공급, 가스교환 등에 영향을 미침으로써 습지에서 식생군집의 구조에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Camporeale and Ridolfi, 2006).

습지는 동역학적인 생태계로서, 지하수위 변동이 식생 동역학에 핵심적인 역할을 하기 때문에(Vesipa et al., 2017), 세계적으로 비선형 상미분방정식을 이용한 일련의 최소한의 수학적 모형을 개발하려는 추세가 있어왔다(You and Liu, 2018). 이러한 모형들에서는 주로 지하수위와 같은 환경적인 교란이 설명 변수로서 취급되며 식생 생체량과 같은 식생 분포패턴에 관한 특성이 반응 변수로 다루어진다. 이러한 모형들로부터 지하수위 - 식생

* To whom correspondence should be addressed.
Department of Environmental Engineering, Pukyong National University
E-mail: skim@pknu.ac.kr,

상호작용이 평가될 수 있으며, 식생 생체량의 분포 패턴을 수학적 방식으로 정량화하는 것이 가능해진다. 하지만, 우리나라의 경우 이러한 방법으로 습지에서 식생이 거동하는 시간적인 동역학을 다룬 연구 사례를 찾아보기는 어려운 실정이다.

이에 본 연구에서는 식생 생체량을 중심으로 최소한의 수학적 인 모형을 구성하고 지하수위에 의해 추진되는 습지 식생의 시간적인 동역학을 설명해보고자 한다. 제안된 개념적인 모형의 수학적 형태는 가능한 물리적인 의미를 부여할 수 있는 매개변수들로 구성된 비선형 상미분방정식이며, 습지 식생 동역학에서 두 개의 우선적인 안정적인 상태(stable state 또는 attractor)의 존재 가능성을 설명하고자 하였다(Schroder et al., 2005). 이를 통하여 어떤 안정적인 상태에서 또 다른 안정적인 상태로의 대 변환에 대한 습지 식생의 취약성이 분석될 수 있을 것이며, 습지 관리 및 복원 프로젝트에서 습지 식생의 환경 반응에 대한 통찰력을 얻을 수 있을 것이다.

2. 연구방법

본 연구에서는 오직 하나의 지배적인 식생 종을 대상으로 식생의 동역학을 설명하는 식생 - 지하수위 상호작용 모형이 제안된다. 제안된 모형으로부터 식생 - 지하수위 상호작용을 통하여 습지가 어떻게 식생의 다중 안정 상태를 가질 수 있을 것인지를 살펴보게 된다. 본 연구에서는 오직 하나의 식생 종이 모형 구조에 포함되어 있기 때문에 원래 식생 종의 소멸에 의한 다른 식생 종의 우점 가능성은 추후 연구로 남겨둔다. 대신에 최대 식생 조건과 비 식생 조건 모두가 안정적인 상태로 수렴될 수 있다. 실제 습지에서는 비 식생 상태가 거의 관찰되지 않는데, 그 이유는 변화된 환경에 적응할 수 있는 식생 종이 원래의 식생 종을 대체하는 경우가 흔히 발견되기 때문이며, 지하수위 상승/하강에 대한 반응으로 식생 생태계의 전환이 유도되기 때문이다. 따라서 본 연구에서 비 식생 안정 상태(즉, 습지 식생의 소멸 상태)는 궁극적으로 모든 식생이 없어진다는 것을 의미하는 것이 아니라, 원래의 식생 종이 없어지면서 생태계 환경 변화에 적응할 수 있는 새로운 식생 종으로의 대변환이 일어났음을 의미하는 것이 타당할 것이다.

습지 식생의 변화는 순 성장률이 logistic 곡선으로 표현되는 성장-소멸 프로세스를 통하여 모형화될 수 있다(Tsoularis and Wallance, 2002).

$$\frac{dN}{dt} = \frac{rN(K-N)}{K} \quad (1)$$

여기서 N 은 식생의 생체량 [M/L^2], r 은 식생의 성장계수이며, K 은 최대 지속가능한 식생의 생체량(carrying capacity, [M/L^2])이다. 식 1(1)에서 $x = N/K$ 을 정의하면, 아래와 같은 비선형 상미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = rx(1-x) \quad (2)$$

식 (2)은 logistic 방정식으로 알려져 있으며, x 은 0에서 1 사

이의 값을 갖는 정규화된 무차원 식생 생체량이다. 식 (2)은 습지 식생 동역학을 위한 최소한의 결정론적 모형으로 간주될 수 있다 (You and Liu, 2018).

식생 - 지하수위 상호작용을 설명하기 위하여 지하수위 D 는 x 의 선형 함수 $D = D_0 + \beta x$ 로 간략화될 수 있다(Figure 1 참조). 여기서 D_0 은 식생이 없을 경우의 지하수위이며, 식생이 존재할 경우 식생 증산으로 인하여 지하수위 D 은 상승하게 된다. 매개변수 β 은 식생에 대한 지하수위의 민감도 계수로 설명될 수 있다. 참고로, 최대 식생 상태 ($x = 1$)와 비 식생 상태 ($x = 0$) 사이의 지하수위의 편차는 약 20 - 50 cm 정도이며(Roy et al., 2000), 1 미터가 넘는 경우도 있는 것으로 보고되고 있다 (Peck and Williamson, 1987). 매개변수 D_0 은 식생에 따라 결정되는 것이 아니라 인근 하천이나 호수의 수위 또는 해수면과 같은 외부의 수문학적 환경에 따라 결정된다. 본 연구에서 D_0 은 결정론적으로 정해진 상수로 취급하고 있지만, 많은 연구들에서 수문학적 변동성을 고려한 확률변수로 다루어지는 경우도 있다(Ridolfi et al., 2006).

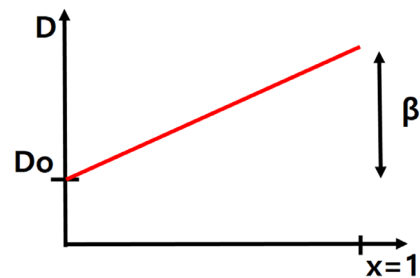


Fig. 1. Conceptual relationship between normalized vegetation biomass and groundwater table depth at wetland ecosystem.

식생 동역학에 대한 지하수위의 영향은 복잡하고 정량화하기 어렵다. 실험적인 연구들에 의하면 지하수위가 식생에 가장 적합한 수준이하로 감소하면 기공 폐쇄 작용 등에 의하여 식생의 광합성이 감소 될 수 있으며(Cooper et al., 2003), 반대로 지하수위가 상승하면 무산소 조건의 형성에 따른 뿌리에서의 가스 교환 등이 감소되어 식생의 생체량이 줄어드는 것으로 알려져 있다 (Bogino and Jobbágy, 2011). 본 연구에서는 식생에 가장 적합한 지하수위 가 형성되지 않을 경우를 고려하기 위하여 아래와 같이 두 가지 형태의 외부 수문환경적인 요인에 의한 습지 손실을 식 (2)에 추가하였다. 식 (3)의 Type-I은 식생의 손실을 선형적으로 고려한 경우이며, 식 (4)의 Type-II는 식생의 손실을 비선형적으로 고려한 경우이다(Strogatz, 1994).

Type-I:

$$\frac{dx}{dt} = rx(1-x) - L(D) \cdot x \quad (3)$$

Type-II:

$$\frac{dx}{dt} = rx(1-x) - L(D) \cdot \frac{x}{A+x} \quad (4)$$

여기서 A 은 $0 < A < 1/2$ 의 범위를 가지는 무차원 매개변수이며, 손실함수 L 은 아래와 같이 간략화될 수 있다.

$$L(D) = m(D - \eta)^2 \tag{5}$$

여기서 m 은 식생의 손실계수이며, η 은 습지에 가장 적합한 지하수위이고, D 은 습지에서의 실제 지하수위를 의미한다. 따라서 실제 지하수위와 최적 지하수위 사이의 편차가 커질수록 습지 식생의 손실 또한 커지게 된다(Figure 2 참조).

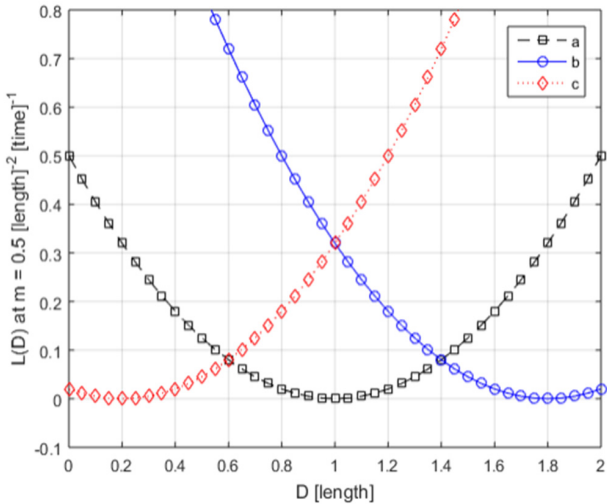


Fig. 2. Loss function with various optimal groundwater table depths.

주로 뿌리로부터 물을 획득하는 식생은 지하수위 아래의 물에 의존하게 된다. 이러한 식생은 지하수위가 너무 상승하거나(물고임에 따른 고사) 또는 너무 하강할 때(즉, 뿌리가 물에 닿지 않는 경우)에 스트레스를 받게 되어 성장에 장애를 일으키게 된다. 이러한 식생에 해당되는 손실함수는 Figure 2의 선 a에 의해 표현될 수 있다. 지하수로부터 물을 얻는 것이 아니라 불포화지대의 토양수분으로부터 물을 얻는 식생은 산소가 충분한 토양과 적절한 토양수분에 의해 성장하게 된다. 이러한 식생의 경우 지하수위가 상승할수록 물고임에 따른 스트레스를 받게 된다. 이러한 식생에 해당되는 손실함수는 Figure 2의 선 b에 의해 표현될 수 있다. 또 다른 조건은 선 b와는 반대로 지하수위가 하강할수록 스트레스를 많이 받는 식생으로 대표될 수 있으며, Figure 2의 선 c로 손실함수를 표현할 수 있다.

3. 결과 및 토의

3.1 선형 손실을 고려하는 경우

가장 간단하고 이상적인 경우로서, 습지에서 지하수위에 따른 식생 손실이 선형적으로 작용하는 경우이다. 즉, 식 (3)의 형태로 손실이 일어난다고 가정하게 된다. 최적 지하수위와 실제 지하수위의 차이가 일정하게 유지되는 환경에서 습지 식생의 지배방정식 (3)은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= rx(1-x) - Lx \tag{6} \\ &= -rx \left(x - 1 + \frac{L}{r} \right) \end{aligned}$$

여기서 \dot{x} 은 dx/dt 을 의미하며, 식생 손실함수 L 은 상수로 취급될 수 있다. 식생 성장계수 r 과 식생 손실상수 L 은 항상 양수이므로, 식 (6)에 의해 지배를 받는 식생은 식생 성장계수와 식생 손실상수의 상대적인 크기에 따라 전혀 다른 거동을 보이게 된다.

식생 성장계수와 식생 손실상수의 상대적인 크기에 따른 식 (6)의 위상궤적(phase portrait)을 Figure 3에 도시하였다. 식 (6)은 두 개의 평형 상태(fixed point)가 있다(즉, $\dot{x}=0$ 이 되는 x). 식생 성장계수가 식생 손실상수보다 큰 경우에는(즉, $r > L$) 초기 값 x_0 가 $0 < x_0 < 1 - L/r$ 의 범위에 있다면 x 은 증가하는 방향으로 거동할 것이며($\dot{x} > 0$ 이므로) 결국 $x = 1 - L/r$ 로 수렴될 것이다. 만약 식생의 초기 상태가 $x_0 > 1 - L/r$ 의 범위에 있다면 $\dot{x} < 0$ 이므로 x 은 감소하는 방향으로 거동하여 결국 또 다시 $x = 1 - L/r$ 의 상태로 수렴될 것이다. 즉, 식 (6)의 초기 값이 0보다 조금이라도 크게 되면(즉, 식생이 조금이라도 존재하고 있다면), 중국에는 식생의 상태가 $x = 1 - L/r$ 의 상태로 안정화 되려는 경향이 발생될 것임을 알 수 있다(Figure 3(a)의 ●). 반대로 식생 성장계수가 식생 손실상수보다 작은 경우에는(즉, $r < L$) 식생이 어떠한 초기 상태에 있는 지에 무관하게 식생이 감소하는 방향으로 거동하여(즉, 어떤 x_0 에서도 항상 $\dot{x} < 0$ 이기 때문) 결국에는 식생이 소멸(즉, 다른 식생 종에 의해 대체)하게 되는 상태에 이르게 될 것이다(Figure 3(b)의 ●). 따라서 선형적인 식생 손실함수를 갖는 식생의 경우에는 습지에서의 지하수위가 일정하게 유지되는 환경이 주어진다면, 식생이 보유하고 있는 식생 성장계수와 지하수위라는 외부 수문환경에 의해 주어지게 되는 식생 손실함수의 상대적인 크기에 따라 현재 습지에 있는 (또는 계획하고 있는) 식생이 안정적인 상태로 환경에 적응하게 될 것인지 또는 결국에는 소멸(또는 원하지 않는 다른 식생 종으로의 대체)하게 될 지가 결정될 것이다.

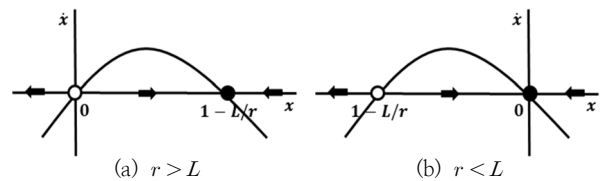


Fig. 3. Phase portrait of vegetation with linear loss function in constant groundwater table depth condition.

Figure 4는 이러한 결과를 도해적으로 나타낸 결과이다. 식생이 습지에서 최대한 번성한 상태로 초기 상태가 조성되더라도 외부 수문환경(본 연구의 경우에는 지하수위)이 그러한 상태를 유지하는데 필요한 조건을 갖추지 못할 경우 식생은 주어진 지하수위에 적응하여 식생의 생체량을 감소시켜가면서 적절한 안정 상태로 수렴될 것이다(Figure 4(a)의 □ 또는 ○). 그러나 습지의 지하수위가 최적 지하수위보다 한계 수준 이상 차이가 나게 될 경우에는 식생은 소멸되어 원하지 않는 다른 식생 종으로 대체될 것이다(Figure 4(a)의 ◇ 또는 ×). 습지 식생의 초기 상태 x_0 가 0.5 수준일 경우에는 습지의 지하수위에 따라 초기 상태보다 식생 생체량이 증가되거나(Figure 4(b)의 □) 감소되면서(Figure 4(b)의 ○) 적절한 안정 상태로 수렴될 수 있으며, 아니면 소멸되어

다른 식생 종류로 대체되는 방향으로 전개될(Figure 4(b)의 ◇ 또는 ×) 가능성이 있음을 살펴볼 수 있다. Figure 4(c)와 같이 습지 식생의 초기 상태가 매우 작을 경우에도 습지 식생의 생체량은 지하수위에 따라 적절한 안정 상태로 적응해갈 수 있으며

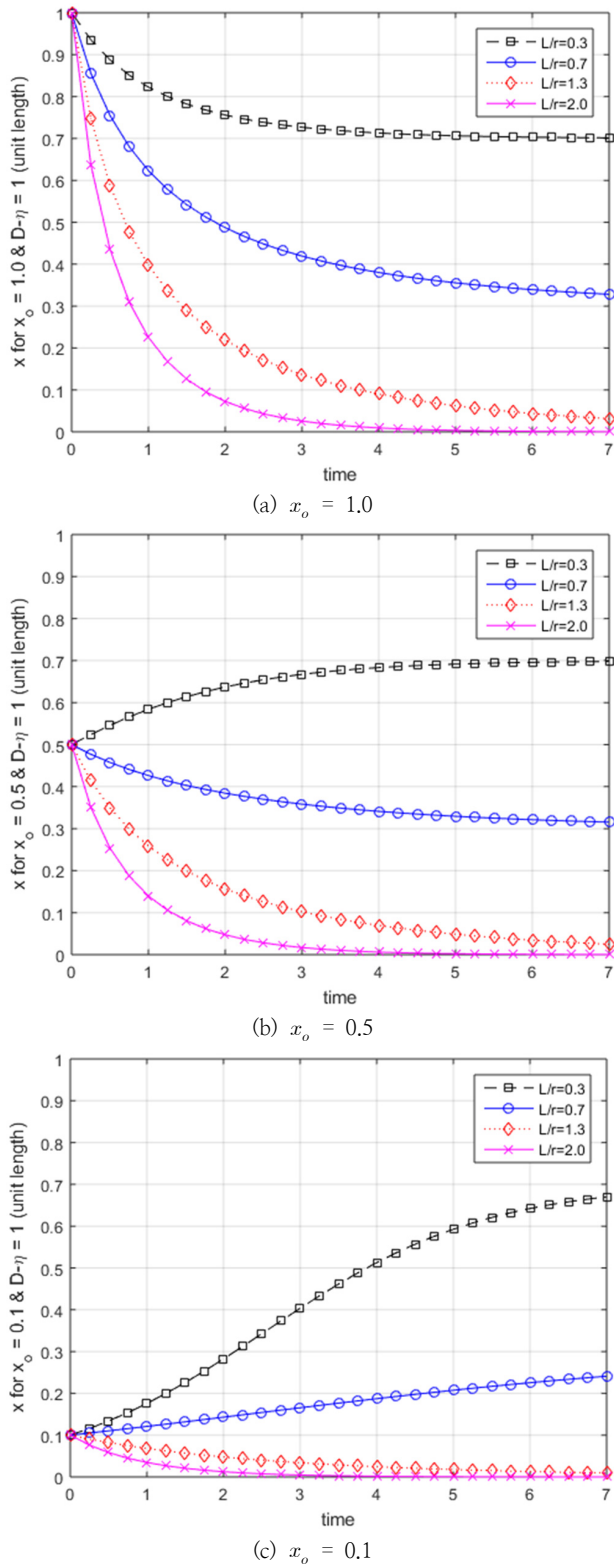


Fig. 4. Temporal evolution of wetland vegetation with various initial conditions and system parameters.

(Figure 4(c)의 □ 또는 ○), 습지의 지하수위가 식생이 견딜 수 있는 한계 깊이 이상으로 줄어들거나 증가할 경우 소멸되어 다른 종의 식생으로 전환되는 과정을 겪게 될 것이다(Figure 4(c)의 ◇ 또는 ×). 상기 살펴본 바와 같이 습지에서의 최종적인 식생 생체량은 초기 상태보다는 습지에서 형성된 지하수위에 반응하면서 외부 수문환경에 적응된 안정 상태로 수렴되거나 또는 소멸되어 다른 식생 종류로 전환될 것임을 살펴볼 수 있다.

3.2 비선형 손실을 고려하는 경우

조금 더 복잡한 경우로서, 습지에서 지하수위에 따른 손실이 비선형적으로 작용하는 경우이다. 즉, 식 (4)의 형태로 손실이 일어난다고 가정된다. 최적 지하수위와 실제 지하수위의 차이가 어느 정도 존재하는 환경에서 습지 식생의 지배방정식 (4)은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{x} = rx(1-x) - \frac{hx}{A+x} \tag{7}$$

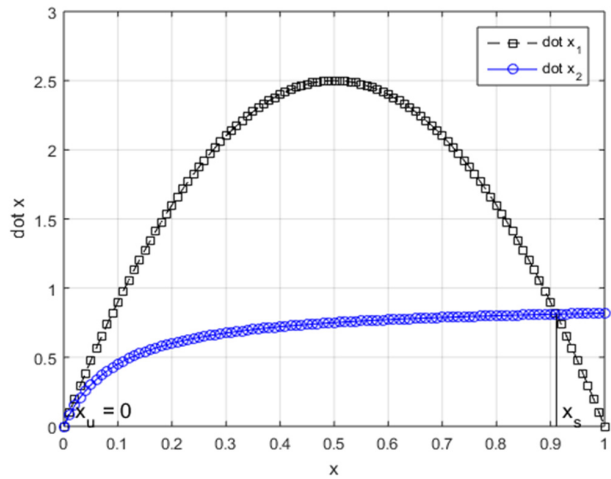
여기서 식생 손실함수 $L(D) = m(D-\eta)^2$ 은 h 로 간략하게 표현되었다. 식생의 전반적인 순 성장 지배방정식 (7)에 의하여 습지에서의 식생은 종국에는 이용 가능한 자원과 지하수위 조건에 의해 허용되는 식생 생체량의 최적 안정 상태 값을 갖게 될 것이다. 이 때, 식생과 지하수위의 양방향 상호 작용에 의하여 식생이 지하수위에 영향을 미치고 지하수위는 다시 식생 손실함수에 영향을 미쳐 식생의 생체량이 결정된다.

손실함수 h 의 크기에 따라 Figure 5와 같이 지하수위에 따라 평형 상태의 패턴이 바뀌는 세 가지 형태의 습지 식생의 거동을 살펴볼 수 있다. 식 (7)의 구조를 살펴보면 $x=0$ 은 지하수위에 무관하게 항상 평형 상태가 되기 때문에, $x=0$ 이외의 평형 상태는 Figure 1에 나타난 바와 같이 x 에 영향을 받는 지하수위 D 의 함수로 표현되는 손실함수 h 에 의해 결정된다. 이를 도해적으로 해석하기 위하여 식 (7)은 아래와 같이 두 가지 경우로 분리할 수 있다.

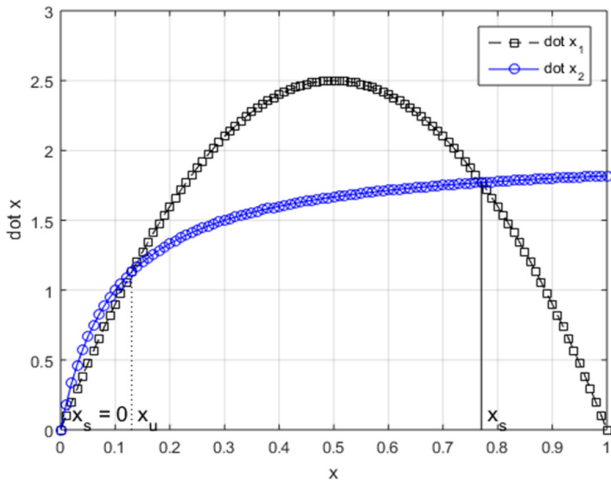
$$\dot{x}_1 = rx(1-x) \quad \& \quad \dot{x}_2 = \frac{hx}{A+x} \tag{8}$$

식 (8)에서 $x-x_1$ 의 관계가 Figure 5의 □-□로 나타낸 선이며, $x-x_2$ 의 관계가 Figure 5에서 ○-○로 나타낸 선이다.

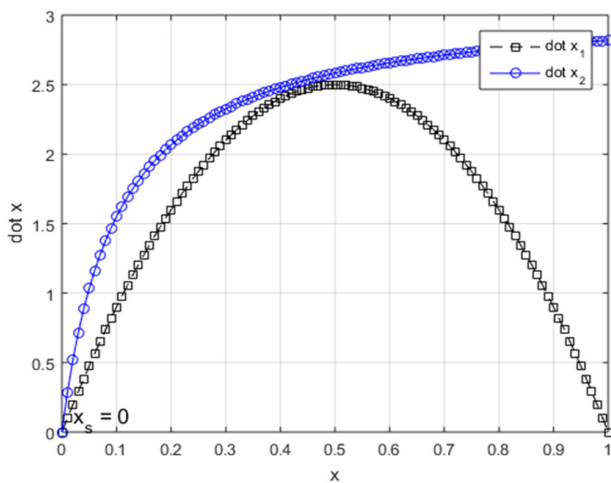
식 (8)에서 $x-x_1$ 곡선의 $x=0$ 에서의 기울기는 r 이 되며, $x-x_2$ 곡선의 $x=0$ 에서의 기울기는 h/A 가 되므로, 손실함수 h 가 Ar 보다 작다면 Figure 5(a)와 같은 그림을 얻을 수 있다. 즉, 습지의 지하수위가 식생에 가장 적합한 지하수위와 큰 차이를 보이지 않는 경우에는 오직 하나의 안정적인 상태(stable fixed point 또는 attractor) $x=x_s$ 을 갖게 된다. 습지의 초기 상태 x_0 가 0에서 x_s 의 범위에 있다면 식 (7)과 (8)에서 알 수 있듯이 \dot{x} 은 항상 양수가 되며 따라서 식생이 증가하는 방향으로 진행될 것이다. 또한 습지의 초기 상태 x_0 가 x_s 보다 큰 범위에 있다면 \dot{x} 은 음수가 되어 식생은 감소되는 방향으로 진행될 것이다. 식생의 변화에 따른 지하수위가 $h < rA$ 을 만족하는 조건에서



(a) only one attractor



(b) two attractors

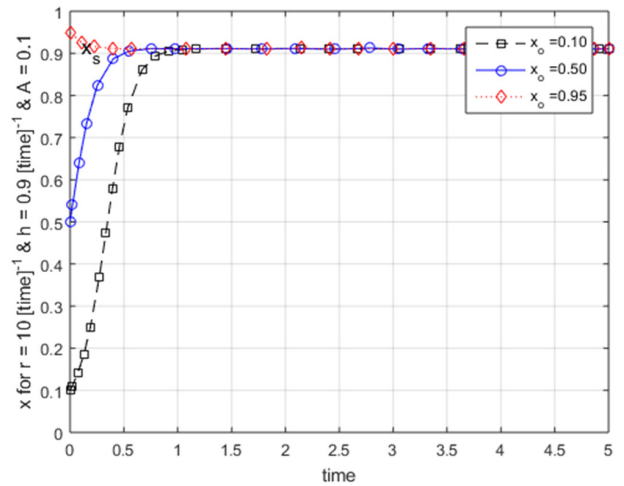


(c) vanished

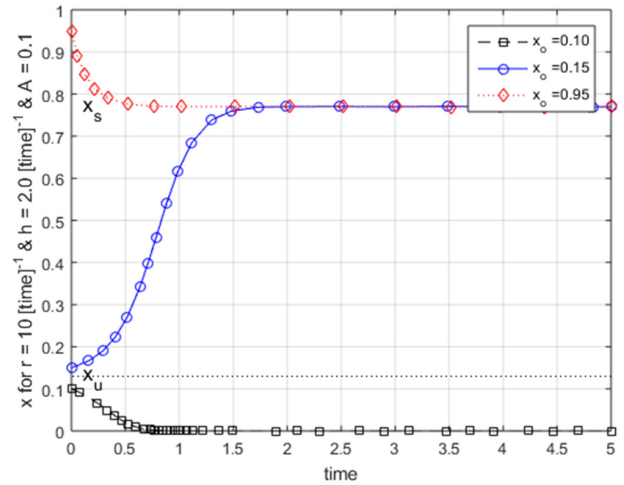
Fig. 5. Fixed points of vegetation dynamics.

유지된다면 식생은 $x = x_s$ 로 수렴되어 안정적인 상태를 유지하게 될 것이다(Figure 6(a) 참조).

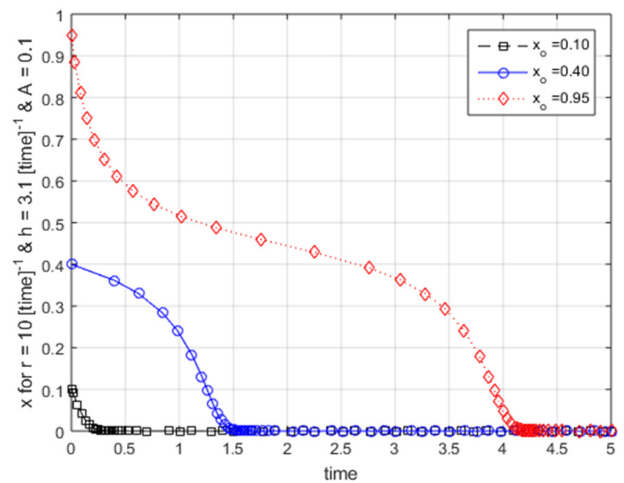
손실함수 h 가 Ar 보다 크다면, 다시 두 가지 경우로 나누어 볼 수 있다. 식 (8)에서 \dot{x}_1 은 $x = 1/2$ 에서 최대 $\dot{x}_1 = r/4$ 가 된다. $x - \dot{x}_2$ 은 항상 증가함수이며, $x = 1/2$ 에서 $\dot{x}_2 = h/(2A+1)$ 의



(a) $h < Ar$



(b) $Ar < h < r(2A+1)/4$



(c) $r(2A+1)/4 < h$

Fig. 6. Temporal evolution of vegetation in wetlands.

값을 갖는다. 따라서 $r/4 > h/(2A+1)$ 인 조건에서는 즉, $h < r(2A+1)/4$ 인 경우에는 Figure 5(b)와 같은 그림을 얻을 수 있다. 즉, 습지의 지하수위가 식생에 가장 적합한 지하수위와 어느 정도의 차이가 있는 수문환경에서는 세 개의 평형 상태가 있음을 살펴볼 수 있다($x = 0, x = x_u, x = x_s$). 습지의 초기 상태

x_0 가 0에서 x_u 의 범위에 있다면 식 (7)과 (8)에서 알 수 있듯이 \dot{x} 은 항상 음수가 되어 식생이 감소하는 방향으로 진행되어 현재의 식생 종은 소멸되고 다른 식생 종으로 전환될 것이다. 습지의 초기 상태 x_0 가 x_u 에서 x_s 의 범위에 있다면 \dot{x} 은 항상 양수가 되며 따라서 식생이 증가하는 방향으로 진행될 것이다. 또한 습지의 초기 상태 x_0 가 x_s 보다 큰 범위에 있다면 \dot{x} 은 음수가 되어 식생은 감소되는 방향으로 진행될 것이다. 즉, 식생의 초기 상태가 x_u 보다 크고 식생의 변화에 따른 지하수위가 $rA < h < r(2A+1)/4$ 을 만족하는 조건에서 유지된다면 식생은 $x = x_s$ 로 수렴되어 안정적인 상태를 유지하게 될 것이다. 지하수위가 $rA < h < r(2A+1)/4$ 의 조건에 있는 경우에는 2개의 attractor와 1개의 불안정한 평형 상태(unstable fixed point)가 있음에 유의해야 한다. 즉, 식생이 불안정한 평형 상태 x_u 보다 조금이라도 큰 상태에 있다면 환경에 적응된 attractor인 $x = x_s$ 인 상태가 되는 방향으로 진행되겠지만, 식생이 x_u 보다 조금이라도 작은 상태가 된다면 소멸되어 다른 식생 종으로 대체되는 방향으로 진행될 것이다(Figure 6(b) 참조). 이러한 경우에는 지하수위의 역할이 습지에서 식생의 상태를 결정하는데 매우 중요한 역할을 하게 됨을 살펴볼 수 있다.

손실함수 h 가 $r(2A+1)/4$ 보다 크다면 Figure 5(c)와 같은 그림을 얻을 수 있다. 즉, 습지의 지하수위가 식생에 가장 적합한 지하수위와 유의미하게 큰 차이를 보이는 경우에는 $x = 0$ 이 유일한 안정적인 평형 상태가 된다. 따라서 습지의 초기 상태가 어떤 상태에 있는지에 상관없이 종국에는 현재의 식생은 소멸하고 다른 종의 식생으로 대체될 것이다(Figure 6(c) 참조).

식 (7)의 우변의 근은 습지 식생의 평형 상태를 나타낸다. 그 중 하나는 항상 $x = 0$ 이다. 이 상태는 식생의 성장에 가장 적합한 지하수위와 실제 습지의 지하수위 사이의 차이에 따라서 안정적이거나 불안정한 상태가 된다. 본 연구에서는 습지의 목표 식생이 주어지게 되면 지하수위에 따른 손실함수 h 가 습지 식생의 안정 상태를 결정하는 유일한 환경변수가 된다. 지하수위가 $h < rA$ 의 조건을 만족할 경우 습지는 주어진 환경에 적응된 안정적인 식생 상태로 진화해갈 것이며, 식생의 소멸 또는 다른 식생 종으로의 전환되는 상태는 불안정한 평형 상태(즉, $x > 0$ 이기만 하면 식생은 $x = x_s$ 로 진행)가 된다(Figure 7 참조). 지하수위에 따른 h 가 rA 보다 커짐에 따라 $x = 0$ 의 상태는 안정적인 상태로 변화된다. 이러한 환경조건에서 습지의 식생은 두 가지 안정된 상태가 나타나게 된다. 그 중 하나는 환경에 적응된 식생이 존재하는 상태(즉, $x = x_s$)이며, 다른 하나는 식생이 소멸되는 상태($x = 0$)이다. 지하수위에 따른 h 가 $r(2A+1)/4$ 이상 증가하게 되면, 환경에 적응된 식생의 안정 상태는 사라지게 된다. 즉, Figure 5(c)에서 볼 수 있듯이 $x = 0$ 이외에서는 교차점이 없기 때문에 이 경우에는 $x = 0$ 이 유일한 안정 상태가 된다.

Figure 7의 $rA < h < r(2A+1)/4$ 의 구간에서와 같이 다중 안정 상태를 가진 습지는 종종 취약성의 개념을 사용하여 분석될 수 있다. 습지의 취약성은 일반적으로 다른 안정 상태로 전이를 야기할 수 있는 교란의 최소 크기로 설명된다(Holling, 1973). 예를 들어 평형 상태 x_s 의 취약성은 x_s 와 x_u 사이의 거리(즉, $|x_s - x_u|$)에 의해 정량화될 수 있다. x_s 가 x_u 와 가까울

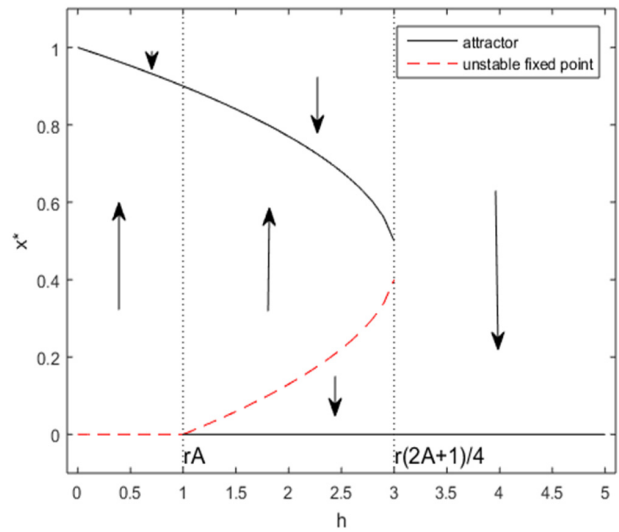


Fig. 7. Bifurcation diagram of vegetation dynamics induced groundwater table depth in wetlands.

경우 식생의 상태는 높은 취약성을 갖게 되어, 비교적 작은 교란에도 습지는 다른 안정 상태인 $x = 0$ 로 전환되려 할 것이다.

다중 안정 상태의 존재는 습지 생태계를 해석하는데 중요한 의미를 가진다. 안정된 식생 상태에 교란이 일어나게 되면 습지가 초기 상태에서 이탈하여 습지의 식생 종이 변화될 수 있음을 의미한다. Figure 6(b)에서 알 수 있듯이, x 가 x_u 아래로 감소되는 상황이 만들어지게 되면 식생 동역학은 소멸되는 상태($x = 0$)로 수렴될 것이다. 이는 식생-지하수위의 상호작용으로 인하여 지하수위를 제어하는 외부 수문학적 조건의 변화가 h 을 감소시켜 $x = 0$ 을 불안정한 상태로 만들지 않는 한 습지는 안정적인 식생 상태로 되돌아가지 않을 것임을 의미한다. 습지 생태계는 외부 교란에 취약하며, 식생이 소멸되는 되돌릴 수 없는 안정 상태로 진행될 수 있다. 외부의 특단적인 수문학적 환경 변화 없이 이러한 안정한 상태로부터의 빠져나오기는 쉽지 않을 것이다. 다른 한편, 이러한 환경에 잘 적응할 수 있는 식생 종(예 들 들어, 손실 패턴이 상이한 내수성 식생 종 또는 얇은 뿌리 식생 종)이 습지에 번성할 수 있을 것이다. 지하수위가 원래 식생 종의 복원을 위해 충분히 적절하게 유지된다면 습지는 원래 상태로 되돌아갈 것이다. 그렇지 않으면 습지는 영구적으로 다른 식생 종으로 변환될 것이다.

이러한 습지에서의 식생 동역학에 대한 이해는 적절한 습지 관리 및 복원에 중요한 역할을 할 것이다. 습지 식생 동역학은 습지 환경에서 식생의 갑작스럽고 돌이킬 수 없는 변화 가능성에 대한 유용한 정보를 줄 수 있으며, 또한 습지에서의 식생의 유지 관리 및 복원 프로젝트의 실현 가능성에 대한 정량적인 기준을 제시할 수 있을 것이다. 교란에 의해 유발된 식생의 손실과 더불어, 습지 생태계는 주변 지하수위 관리의 변화로 인하여 안정적인 소멸 상태로 전환을 야기할 수도 있다. Figure 8에 도식화한 바와 같이 손실함수 h 가 증가하면서 안정적인 식생 상태를 갖는 습지 시스템에서 소멸과 안정적인 습지 상태가 공존하는 습지 시스템으로 전환될 수 있으며, 손실함수가 더 증가할 경우 습지 시스템은 식생이 소멸되는 상태(즉, 다른 식생 종으로 변환)로 진화될 것이다.

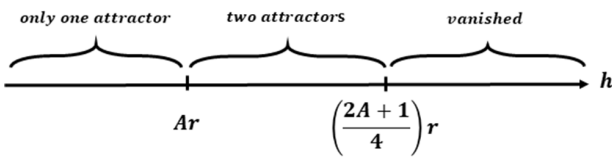


Fig. 8. Attractors of vegetation dynamics induced by ground water table depth.

4. 결 론

습지는 육상 생태계와 수중 생태계 사이의 전이 영역으로서 중요한 생태계 서비스를 제공하며, 식생은 습지 생태계를 유지하는데 핵심적인 요소이다. 습지에서의 식생 동역학은 자연적 또는 인위적 간섭에 기인하는 지하수위의 변화에 크게 영향을 받고 있는데, 지하수위는 식생의 성장에 영향을 주는 기본적인 변수로 간주되어 습지에서 식생군집의 구조에 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 습지에서의 식생을 중심으로 최소한의 수학적 인 모형을 구성하고 지하수위에 의해 추진되는 습지 식생의 시간적인 동역학을 설명해보고자 하였다. 먼저, 습지에서 지하수위에 따른 식생의 손실이 선형적으로 작용하는 이상적인 경우를 살펴보았으며, 이어서 식생 손실이 비선형적으로 작용하는 보다 일반적인 경우를 살펴보았다.

선형적인 식생 손실함수를 갖는 습지 식생의 경우에는 습지에서 지하수위가 일정하게 유지되는 수문환경이 주어진다면, 크게 두 개의 안정 상태 중 하나로 식생이 적응해 갈 것으로 분석되었다. 즉, 식생 고유의 성장과 관련된 매개변수와 지하수위라는 외부수문환경에 의해 주어지는 손실과 관련된 인자의 상대적인 크기에 따라 현재 습지에 우점하고 있는 식생이 안정적인 상태로 환경에 적응하게 될 것인지 또는 결국에는 소멸되어 다른 식생 종으로의 대체될 것인지가 결정됨을 살펴볼 수 있었다.

습지에서 지하수위에 따른 손실이 비선형적으로 작용하는 경우에는 선형적인 경우보다 더 복잡한 평형 상태가 전개될 것으로 분석되었다. 습지의 지하수위가 식생에 가장 적합한 지하수위와 큰 차이를 보이지 않는 습지에서는 외부 환경에 적응된 오직 하나의 안정적인 식생 상태로 진화해 갈 것이며, 여러 가지 이유에 의해서 지하수위가 식생에 적합한 수준에서 크게 벗어나 있는 습지의 경우에는 현재의 식생 종은 소멸되어 다른 식생 종으로 대체되는 경로를 따르게 될 것으로 분석되었다.

흥미로운 구간은 습지의 지하수위가 식생에 가장 적합한 수준에서 살짝 벗어나 위치된 습지에서 발견될 수 있다. 즉, 습지의 지하수위가 식생에 가장 적합한 지하수위와 어느 정도의 차이가 있는 수문환경에서는 세 개의 평형 상태가 존재할 수 있으며, 습지 식생의 현재 상태에 따라 소멸될 수도 또는 외부수문환경에 적응한 안정된 상태로 수렴될 수도 있음을 살펴볼 수 있었다. 이러한 환경에서는 식생과 연계된 지하수위의 역할이 습지에서의 식생 상태를 결정하는데 매우 중요한 역할을 하게 될 것이다.

이와 같이 다중 안정 상태가 존재할 경우 안정된 식생 상태에 교란이 일어나게 되면 습지가 초기 상태에서 이탈하여 습지의 식생 종이 변화될 가능성이 있게 되며, 습지 생태계는 외부 교란에 취약하여 식생이 소멸되는 되돌릴 수 없는 안정 상태로 진행될 수 있음을 살펴볼 수 있었다. 이러한 경우 외부의 인위적인

지하수위의 변화 없이는 원래의 안정된 식생 상태로 회귀하는 것이 쉽지 않을 것이다. 이러한 습지에서의 식생 동역학에 대한 이해는 적절한 습지 관리 및 복원에 중요한 역할을 할 것이다. 습지 식생 동역학은 습지 환경에서 식생의 갑작스럽고 돌이킬 수 없는 변화 가능성에 대한 유용한 정보를 줄 수 있으며, 또한 습지에서의 식생의 유지관리 및 복원 프로젝트의 실현 가능성에 대한 정량적인 기준을 제시하는 초석이 될 수 있을 것으로 기대된다.

다만 본 연구에서 제시한 연구는 정성적으로 모형을 구축하고 그 변화를 살펴본 것이므로 추후 실제 관측자료를 이용하여 연구가 진행된다면 더 구체적인 결과를 제시할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행되었음(NRF-2019R1A2C1003114).

References

- Bogino, S. M., and Jobbágy, E. G. (2011). Climate and groundwater effects on the establishment, growth and death of *Prosopis caldenia* trees in the pampas (Argentina). *Forest Ecology and Management*, 262, 1766–1774. doi:[10.1016/j.foreco.2011.07.032](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.032)
- Camporeale, C., and Ridolfi, L. (2006). Riparian vegetation distribution induced by river flow variability: A stochastic approach. *Water Resources Research*, 42, W10415. doi:[10.1029/2004WR004933](https://doi.org/10.1029/2004WR004933)
- Cooper, D. J., Dámico, D. R., and Scott, M. L. (2003). Physiological and morphological response patterns of *Populus deltoides* to alluvial groundwater pumping. *Environmental Management*, 31, 0215–0226. doi:[10.1007/s00267-002-2808-2](https://doi.org/10.1007/s00267-002-2808-2)
- Friedman, J. M., and Auble, G. T. (1999). Mortality of riparian box elder from sediment mobilization and extended inundation. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15, 463–476. doi:[10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199909/10\)15:5<463::AID-RRR559>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199909/10)15:5<463::AID-RRR559>3.0.CO;2-Z)
- Gurnell, A. M., Bertoldi, W., and Corenblit, D. (2012). Changing river channels: The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. *Earth-Science Reviews*, 111, 129–141. doi:[10.1016/j.earscirev.2011.11.005](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.11.005)
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 4, 1–23. doi:[10.1146/annurev.es.04.110173.000245](https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245)
- Lite, S. J., Bagstad, K. J., and Stromberg, J. C. (2005). Riparian plant species richness along lateral and longitudinal gradients of water stress and flood disturbance, san Pedro

- river, Arizona, USA. *Journal of Arid Environments*, 63, 785–813. doi:[10.1016/j.jaridenv.2005.03.026](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.026)
- Loheide, S. P., and Booth, E. G. (2011). Effects of changing channel morphology on vegetation, groundwater, and soil moisture regimes in groundwater-dependent ecosystems. *Geomorphology*, 126, 364–376. doi:[10.1016/j.geomorph.2010.04.016](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.016)
- Meek, C. S., Richardson, D. M., and Mucina, L. (2010). A river runs through it: Land-use and the composition of vegetation along a riparian corridor in the Cape Floristic Region, South Africa. *Biological Conservation*, 143, 156–164. doi:[10.1016/j.biocon.2009.09.021](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.09.021)
- Peck, A. J., and Williamson, D. R. (1987). Effects of forest clearings on groundwater, *Journal of Hydrology*, 94, 47–65. doi:[10.1016/0022-1694\(87\)90032-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90032-1)
- Ridolfi, L., D’Odorico, P. and F. Laio (2006). Effect of vegetation – water table feedbacks on the stability and resilience of plant ecosystems, *Water Resources Research*, 42, W01201. doi:[10.1029/2005WR004444](https://doi.org/10.1029/2005WR004444)
- Roy, V., Ruel, J.-C. and Plamondon, A. P. (2000). Establishment, growth and survival of natural regeneration after clearcutting and drainage on forested wetlands, *For. Ecol. Manage.*, 129, 253–267. doi:[10.1016/S0378-1127\(99\)00170-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00170-X)
- Schroder, A., L. Persson, and M. D. De Roos (2005), Direct experimental evidence for alternative stable states: A review, *Oikos*, 110, 3–19. doi:[10.1111/j.0030-1299.2005.13962.x](https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13962.x)
- Stogatz, S. H. (1994), *Nonlinear dynamics and chaos*, Addison-Wesley Publishing Company, 498p.
- Tsoularis, A., and J. Wallance (2002), Analysis of logistic growth models, *Math. Biosci.*, 179, 21–55. doi:[10.1016/S0025-5564\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0025-5564(02)00096-2)
- Vesipa, R., Camporeale, C., & Ridolfi, L. (2017). Effect of river flow fluctuations on riparian vegetation dynamics: Processes and models. *Advances in Water Resources*, 110, 29–50. doi:[10.1016/j.advwatres.2017.09.028](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.028)
- You X, Liu J. Modeling the spatial and temporal dynamics of riparian vegetation induced by river flow fluctuation. *Ecol Evol*. 2018;8:3648–3659. doi:[10.1002/ece3.3886](https://doi.org/10.1002/ece3.3886)