

LP 최적화에 의한 토지피복도 기반 토지계 발생부하 원단위 산정

박경옥·이창희*†

국립환경과학원 물환경연구부 유역총량연구과
*중원대학교 신재생에너지지원학과

Land Generated Waste Load Unit Estimation Based on Land Use Map with LP Optimization

Park, Kyung Ok·Lee, Chang Hee**

Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research

*Department of Renewable Energy Resources, Jungwon University

(Received : 27 June 2016, Revised: 21 July 2016, Accepted: 22 July 2016)

요약

토지이용에 따른 수질에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 토지피복기반의 토지계 발생부하 원단위가 필요하다. 실측 자료를 기반으로 토지피복기반 원단위를 도출하기에는 많은 인력과 시간을 필요로 한다. 이에 본 연구에서는 최적화를 통해 토지피복기반의 원단위 도출 방법을 제안하였다. 최적화란 주어진 조건 안에서 가장 좋은 최적해를 구하는 과정이며, 본 연구에서는 상용 프로그램인 Microsoft Excel에서 제공하고 있는 Excel Solver를 이용하여 최적화를 수행하였다. 공주시와 서천군의 2010년 위성영상 기반으로 작성된 2012년 환경부 중분류 토지피복도를 활용하여, BOD, T-N, T-P에 대한 토지피복기반 원단위를 도출하였다. 본 연구에서 수행한 토지피복기반 원단위 산정 연구는 국토 이용에 따른 오염원 발생변화를 보다 명확히 판별할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 : 토지계 발생부하 원단위, 토지피복, 최적화, Linear Programming

Abstract

Land Generated Waste Load Unit(LGWLU) estimation based on land use data is required to understand the impact of land use on water quality. The method of estimating LGWLU based on the monitoring data requires a lot of time and manpower. In this study, we propose a method of land pollution unit load estimation based on land use data with LP optimization. Optimization is the process to obtain the best possible optimal solution in a given condition. This study carried out optimization by using excel solver in Microsoft Excel. This study derived LGWLU of BOD, T-N, T-P in Gongju-Si and Seocheon-Gun by using the 2012 land use map made by ministry of environment based on 2010 satellite image. This study about LGWLU estimation is expected to be able to determine more clearly the water pollution caused by land use changes.

Key words : Land Generated Waste Load Unit, Land use, Optimization, Linear Programming

1. 서론

토지계 발생부하량은 주로 강우 시 지표면 유출수와 함께 발생하는 오염물질로서 수질오염총량제에서는 토지계의 발생부하량을 실측에 의하여 산정하거나, 지목별 면적과 연평균 발생부하원단위를 이용하여 연평균 발생부하량을 산정하도록 규정한다(NIER, 2014). 토지계 발생부하량과 관련하여 환경제도와 토지이용도와 연계하는 것은 쉬운 일이 아니다(Vergura and Jones, 2000; Orr et al., 2007). 왜냐하면 토지

계 발생부하량은 유역의 기상학적, 수문학적, 토양적, 토지피복적 특성 등 다양한 조건에 따라 변하므로 이를 모니터링하거나 제어하는 것이 쉽지 않기 때문이다(Candela et al., 2009; USEPA, 2005; Wang and Yang, 2008; Yang and Wang, 2010). 이와 함께 수질오염총량제에서는 토지계 발생 원단위가 지목기반으로 설정·운영되고 있기 때문에 지목을 변경하지 않고 토지피복이 변경된 부분을 반영할 수 없다. 즉, 하천 지목에서의 생태하천복원사업, 대지 지목에서의 녹지조성과 같은 지목 변경이 이루어지 않은 상태에서 토지피복의 변화가 발생하게 될 경우에는 토지계 발생부하량은 이러한 토지피복의 변화를 반영하지 못한다. 토지피복의 변화를 반영하기 위해서는 토지피복기반의 발생부하량 원단위가 필요하

* To whom correspondence should be addressed.
Department of Renewable Energy Resources, Jungwon University.
E-mail: chlee@jwu.ac.kr

다. 실측자료를 기반으로 원단위를 도출하기 위해서는 유량과 수질을 연속 측정하여 수문곡선(hydrograph)과 오염부하곡선(pollutograph)을 도출함으로써 산정될 수 있으나(NIER, 2014; Kang et al., 2014), 대표지역의 선정 및 실측이 어렵고, 대표지역에서 산정된 원단위에 대해서 대표지역 이외 지역에서 적용성을 담보할 수 없는 점, 그리고 상당한 인력과 시간을 필요로 하는 점 등의 한계가 있다(Han, 2015; USEPA, 2005).

이에 본 연구에서는 이러한 현실적인 문제점을 극복하기 위해 기존 지목기반 원단위를 활용하되 최적화를 통해 토지피복기반의 원단위를 도출하였다. 최적화(Optimization)란 주어진 조건 안에서 가장 좋은 최적해를 구하는 과정이며, 본 연구에서는 상용 프로그램인 Microsoft Excel에서 제공하고 있는 Excel Solver의 LP(Linear Programming)를 이용하였다. 여기서 LP는 비선형 최적화 방법에 비해 적용이 용이하다는 장점이 있고, 결과를 도출하는데 짧은 계산 시간을 가지면서 많은 영역에서 복잡하고 어려운 비선형 최적화 방법과 비슷한 결과의 값을 제공할 수 있다(Han et al., 2012; Vanderbei, 2001).

토지피복기반의 원단위는 토지피복지도 분류체계에서 22개 항목으로 구성된 중분류를 기준으로 BOD, T-N, T-P에 대해서 토지피복기반 원단위 도출을 수행하였는데, 공주시와 서천군의 2010년 위성영상 기반으로 작성된 2012년 환경부 중분류 토지피복도를 활용하였다.

2. 지목기반 토지계 발생부하량

토지계 발생부하량은 토지이용 형태에 따라 오염물질 발생 여건이 달라 장기간에 걸친 조사가 이루어져야 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다(NIER, 2012; Jeon et al, 2010). 그러나 실측여건 등의 한계로 수질오염총량관리기술지침(NIER, 2014)에서는 식 (1)과 같이 지목별 면적과 연평균 발생부하원단위를 이용하여 연평균 발생부하량을 산정하도록 규정하고 있다.

$$\text{토지계발생부하량} = \sum(\text{지목별면적} \times \text{지목별연평균발생부하원단위}) \quad (1)$$

여기서 지목은 토지의 주된 용도에 따라 28가지로 분류하

여 지적공부에 등록된 것을 말하며, 수질오염총량관리기술지침에서는 Table 1과 같이 28가지 지목을 다시 전, 담, 임야, 대지, 기타 등 재분류된 5가지 항목에 대한 원단위를 규정하고 있다.

3. 토지피복기반 원단위 산정

3.1 LP 최적화

최적화 모형의 세 가지 구성 요소는 의사 결정변수(decision variable), 목적함수(objective function), 제약조건(constraints)이다. 의사 결정 변수란 의사결정의 대상을 의미하며, 목적함수는 의사결정의 목표를 의미한다. 마지막으로 제약조건이란 목표를 성취하는 과정에서 제한되는 한계를 의미한다.

3.1.1 결정변수

토지피복별 원단위가 결정변수로 설정 되는데, 본 연구에서는 Table 2와 같이 토지피복지도 분류체계에서 22개 항목으로 구성된 중분류에 대해서 원단위를 도출해야 하므로, BOD, T-N, T-P 등 수질항목별로 각각 22개의 미지수가 발생되게 된다.

3.1.2 목적함수

수질오염총량제에서 이용되고 있는 지목기반 원단위를 활용하여 산정된 발생부하량 결과와 도출된 토지피복기반 원단위를 이용하여 산정된 발생부하량의 결과를 이용하여 오차를 구하게 되며, 목적함수는 이 오차를 최소화 하는 것으로 식 (2) ~ 식 (4)와 같이 설정된다. 이는 BOD 항목뿐만 아니라 T-N, T-P항목에 대해서도 동일한 목적함수를 취할 수 있다.

$$\text{Minimize Error} \quad (2)$$

$$= \left(\sum_{i=1}^n Lu_{BOD_i} \times A_i - \sum_{j=1}^m Lis_{BOD_j} A_j \right)^2$$

$$\text{Minimize Error} \quad (3)$$

$$= \left(\sum_{i=1}^n Lu_{TN_i} \times A_i - \sum_{j=1}^m Lis_{TN_j} A_j \right)^2$$

$$\text{Minimize Error} \quad (4)$$

$$= \left(\sum_{i=1}^n Lu_{TP_i} \times A_i - \sum_{j=1}^m Lis_{TP_j} A_j \right)^2$$

Table 1. Land Generated Waste Load Unit Based on Cadastral Items

Cadastral Items		Land Generated Waste Load Unit (kg/km ² /Day)		
Modified Items in TMDL	Original Items	BOD	T-N	T-P
Dry Paddy	Dry Paddy, Orchard	1.59	9.44	0.24
Rice Paddy	Rice Paddy	2.30	6.56	0.61
Forestry	Forestry	0.93	2.20	0.14
Structural Site	Housing Site, Factory Site, School Site, Parking Place, Gas Station Site, Warehouse Site, Road, Railroad Site, Physical Site, Historical Site	85.90	13.69	2.10
Miscellaneous Land	Pasture, Mineral Spring, Salt Pond, Bank, River, Ditch, Pond March, Fish Farm, Water Supply Site, Park, Burial Ground, Miscellaneous Land	0.960	0.759	0.027

여기서 Lu_{BOD_i} , Lu_{TN_i} , Lu_{TP_i} 는 각각 토지피복기반 BOD, TN, TP 원단위, A_i 는 토지피복에 해당하는 면적, Lis_{BOD_j} , Lis_{TN_j} , Lis_{TP_j} 는 각각 지목기반 BOD, TN, TP원단위, A_j 는 지목에 해당하는 면적, n 은 토지피복도 증분류 22개 항목, m 은 수질오염총량제의 지목 분류 5개 항목이다.

3.1.3 제약조건

시군 행정구역 면적을 보다 세분화하여 지역내의 토지피복기반 발생부하량과 지목기반 발생부하량과 동일하다는 것으로 방정식을 설정하였다. 세분화된 지역 내에서 다양한 지목 및 다양한 토지피복 형태가 나타날 수 있으며 식 (5)과 같이 부분합으로 표현될 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{22} Lu_{BOD_i} \times A_i = \sum_{j=1}^5 Lis_{BOD_j} \times A_j \quad (5)$$

이러한 방식으로 T-N, T-P 역시 토지피복기반 원단위를 산정하였는데, 원단위가 음의 결과가 나올 수 없으므로 모든 원단위는 0 보다 크도록 하는 조건을 제약조건을 추가하였다. 다만 수(水)역의 경우 오염발생원이 없는 것으로 가정하고 원단위는 0으로 고정하였다.

3.2 대상지역의 선정 및 현황

토지피복기반 원단위를 산정하기 위해 특성이 비슷한 지역을 분석하는 것은 분석의 효율성 및 일반성을 해치지 때문에 Table 2와 같이 산림지역(Broad leaf, Coniferous, Mixed forest)면적을 많이 포함한 공주시와, 논(Paddy field), 밭(Cropland) 등 농업지역 면적을 많이 포함한 서천군 자료를 활용하여 분석하였다. 제약조건을 만들기 위하여 공주시의 경우 20개 지역으로 세분화하였고, 서천군의 경우 22개의 지역으로 세분화하였는데, 일차적으로는 읍면동 및 동리 행정구역 경계를 바탕으로 세분화 하였고, 행정구역 면적이 큰 지역의 경우 이차적으로 배수구역을 기반으로

하여 세분화하였으며, 시가화된 지역과 같이 면적이 협소한 지역의 경우 인접 동리를 병합하였다.

대상지역의 지목 분포와 토지피복 분포 형태를 비교하기 위하여 Fig.1과 같이 방사형 차트로 도시하였는데, 지목별 면적을 기준으로 토지피복도와의 면적 비율을 나타낸 그림이다. 공주시의 경우 Fig. 1(a)와 같이 임야 지목인 경우 토지피복도의 산림지역의 면적과 비교하여 비율이 1에 가깝게 나오는데, 이는 지목 면적과 토지피복 면적이 유사하다는

Table 2. Area Ratio of Land use Types in Test-bed

Land use Types	Area Ratio	
	Gongju-Si	Seocheon-Gun
Residential	1.07%	1.09%
Industrial	0.12%	0.37%
Commercial	0.21%	0.42%
Recreational	0.02%	0.06%
Transportation	1.98%	1.92%
Public Use	0.15%	0.21%
Paddy Field	7.82%	34.08%
Cropland	4.78%	14.49%
Farm Plant	0.39%	0.36%
Farmstead	0.31%	0.49%
Other Farm	0.23%	0.47%
Broad Leaf	58.27%	10.79%
Coniferous	12.00%	23.53%
Mixed Forest	5.97%	3.06%
Natural Grass	2.09%	1.29%
Artificial Grass	1.22%	1.44%
Inland Marsh	0.99%	1.39%
Coastal Marsh	0.00%	0.21%
Quarry Barren Field	0.03%	0.20%
Other Barren Field	0.59%	0.86%
Inland Water Bodies	1.74%	3.17%
Ocean Water	0.00%	0.11%



Fig. 1. Comparison of Cadastral with Land Use Types.

것을 의미한다. 이에 반해 대지, 전 등의 지목은 0.5 미만의 값을 나타내는데, 이는 지목 면적이 100이면 토지피복도의 유사한 지점은 50 미만이라는 것을 의미한다. 즉, 방사형 차트 내 다각형 모양의 침도가 높을수록 상관성이 높다는 것을 의미하는데, 임야는 지목과 토지피복도가 비슷한 분포를 나타내기 때문에 임야에 대한 상관성은 1에 가까운 결과를 나타내지만, 임야를 제외한 전, 답, 대지, 기타 지목은 낮은 상관성을 나타내고 있다. 서천군 역시 Fig.1(b)와 같이 임야, 답 지목에 대한 상관성은 큰 것으로 나타났지만, 대지, 전, 기타 지목과 토지피복도와는 낮은 상관성을 보여준다. 이는 토지피복도의 변화를 지목이 반영을 잘 하지 못하는 것을 나타낸다.

3.3 토지피복기반 원단위 산정

LP 최적화를 통해 공주시 및 서천군에 대한 토지피복기반 원단위가 Table 3과 같이 도출되었다. Table 3과 같이 산정된 토지피복기반의 원단위를 검증하기 위하여 산정된 토지피복기반 원단위를 이용한 발생부하량과 기존 지목기

반의 원단위를 이용하여 산정된 발생부하량을 공주시 및 서천군에 대해서 Table 4와 같이 산정하여 비교하였다. Table 4에서 BOD는 3.1%와 -7.3%, T-N은 10.8%와 2.3%, 그리고 T-P는 10.7%와 -1.2%의 오차가 발생하였다. 이는 공주시, 서천군 두 개 시군에 대한 데이터만을 이용했기 때문인 것으로 판단되고, 산정된 토지피복기반 원단위를 통해 계산된 발생부하량이 지목기반 원단위를 이용하여 산정된 발생부하량과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

3.4 토지피복의 영향과 발생부하량과의 상관관계

각 시군별 발생부하량 변화에 영향을 주는 토지피복의 영향을 분석하기 위하여 발생부하량과 토지피복별 면적 변화에 대한 상관성을 분석하였다. 이를 위해 산정된 토지피복기반 원단위를 활용하여 5년마다(2002년, 2007년, 2012년) 작성된 환경부 토지피복도 자료를 활용하여 Table 5와 같이 해당 년도의 발생부하량을 산정하였고, Table 6과 같이 시계열별 발생부하량 상관계수를 검토하였다. 연도별 발생부하량 분석

Table 3. Calculated Land Generated Waste Load Unit Based on Land Use Types

Land Use Items	Code	Land Generated Waste Load Unit (Kg/Km ² /Day)		
		BOD	T-N	T-P
Residential	110	68.39	12.076	2.645
Industrial	120	84.78	15.367	1.179
Commercial	130	83.01	10.839	1.721
Recreational	140	89.24	31.848	6.378
Transportation	150	108.90	17.718	2.838
Public Use	160	86.11	4.695	1.939
Paddy Field	210	2.28	7.795	0.610
Cropland	220	1.05	15.310	0.346
Farm Plant	230	10.51	7.7954	1.679
Farmstead	240	0.99	3.83	0.344
Other Farm	250	27.89	1.907	1.480
Broad Leaf	310	1.12	2.208	0.154
Coniferous	320	1.27	2.467	0.125
Mixed Forest	330	1.19	2.338	0.140
Natural Grass	410	1.97	2.133	0.135
Artificial Grass	420	3.04	1.664	0.098
Inland Marsh	510	1.52	1.438	0.081
Coastal Marsh	520	1.10	0.985	0.045
Quarry Barren Field	610	12.80	3.224	1.473
Other Barren Field	620	38.39	13.673	1.946
Inland Water Bodies	710	0.000	0.000	0.000
Ocean Water	720	0.000	0.000	0.000

Table 4. Comparison of Land Generated Waste Loads Made by Land Use and Cadastral Data

Categories		Gongju-Si			Seocheon-Gun		
		BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
Generated Waste Load (Kg/Day)	Land Use Map	4,515.8	3,923.62	296.217	2,033.2	2347.02	159.389
	Cadastral Data	4,381.0	3,541.11	267.597	2,193.7	2,294.73	161.385
Error(%)		3.1	10.8	10.7	-7.3	2.3	-1.2

결과 공주시의 경우 BOD 발생부하량은 증가, T-N발생부하량은 감소, T-P 발생부하량은 감소 경향을 나타내었다. 반면 서천군의 경우 BOD발생부하량은 감소, T-N발생부하량은 증가, T-P 발생부하량은 감소하는 경향을 나타내었다.

이에 대한 세부분석을 위하여 토지피복 면적 변동에 따른 오염물질별 발생부하량 상관분석을 수행하였다. Table 7에서 공주시의 기타재배지가 과거(2002년)에 비해 줄어드는 경향을 보여주며(시간에 따른 기타재배지의 상관도가 -0.59), 면적의 기타재배지 면적 감소에 따른 발생부하량 증가와의 상관도는 줄어드는 경향(상관도 -1)을 보여준다. 이는 기타재배지 면적이 줄어들면서 발생부하량이 증가했다는 것을 의

미한다. 즉, 공주시의 BOD 발생부하량의 증가원인은 기타재배지가 감소하는 것에 기인하고, 서천군의 BOD 발생부하량 감소원인은 기타재배지가 증가함에 기인한 것으로 해석할 수 있다. 이와 같은 방법으로 다른 항목을 분석해 보면 T-N 발생부하량의 경우 공주시는 감소하고 있고, 서천군의 경우 증가하였는데, 그 원인은 공주시는 밭이 감소한 반면, 서천군은 밭이 증가함에 따른 것으로 해석할 수 있다. T-P 발생부하량의 경우 두 지역 모두 감소하는 경향이 나타났는데, 그 원인으로 주거지역, 공공시설지역, 논, 혼효림, 내륙수가 감소한 반면, 교통지역, 하우스재배지, 자연초지, 인공초지, 내륙수가 증가하여 나타난 결과로 해석된다.

Table 5. Changes of Land Generated Waste Load in Test-beds

Year	Gongju-Si (Kg/Day)			Seocheon-Gun (Kg/Day)		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
2002	4,311.3	4,147.12	309.660	2,685.4	2,287.32	185.285
2007	4,665.4	4,140.73	310.846	2,725.7	2,271.34	184.810
2012	4,515.8	3,923.62	296.217	2,033.2	2,347.02	159.389

Table 6. Correlation Coefficients of Time Series for Land Generated Waste Load

Year	BOD	T-N	T-P
Gongju-Si	0.53	-0.90	-0.86
Seocheon-Gun	-0.87	0.78	-0.90

Table 7. Correlation Coefficients of Land Use Area Changes and Land Generated Waste Load Changes

Area	Land Use Types	Correlation Coefficient of Area and Time Series	Water Quality Components	Correlation Coefficients of Land Use Area Changes and Land Generated Waste Load Changes
Gongju-Si	Other Farm	-0.59	BOD	-1.00
	Cropland	-0.67	T-N	0.92
	Residential	-0.90	T-P	1.00
	Transportation	0.97		-0.72
	Public Use	-0.69		0.96
	Paddy Field	-0.93		0.99
	Farm Plant	0.89		-1.00
	Mixed Forest	-0.97		0.96
	Natural Grass	0.87		-1.00
	Artificial Grass	1.00		-0.87
	Inland Marsh	0.97		-0.96
	Inland Water Bodies	-0.99		0.91
Seocheon-Gun	Other Farm	0.33		BOD
	Cropland	0.93	T-N	0.96
	Residential	-0.86	T-P	1.00
	Transportation	0.97		-0.93
	Public Use	-0.85		0.54
	Paddy Field	-1.00		0.90
	Farm Plant	0.89		-1.00
	Mixed Forest	-0.79		0.98
	Natural Grass	0.77		-0.97
	Artificial Grass	0.90		-1.00
	Inland Marsh	0.86		-1.00
	Inland Water Bodies	-0.67		0.93

4. 결 론

토지피복기반 토지계 발생부하 원단위를 산정하기 위해 LP 최적화를 활용하였고, 산정된 원단위를 이용하여 검증한 결과 토지피복기반 원단위를 적용하여 산정한 발생부하량과 지목 기반 발생부하량이 잘 맞는 것으로 나타났다. 원단위 개발 과정에서 지목 분포와 토지피복 분포 형태의 비교를 통해 지목 분포와 토지피복의 분포가 일치하지 않는 부분을 확인할 수 있었으며, 산정된 원단위를 통해 토지피복의 변화에 따른 토지발생부하량의 변화를 추적할 수 있었다. 이와 함께 발생부하량과 토지피복별 면적 변화에 대한 상관성을 분석하였는데, 이를 통해 발생부하량 변화에 영향을 주는 토지피복의 영향을 분석할 수 있었다. 한편, 산정된 토지피복기반 원단위는 공주시, 서천군 두 개 시군 데이터를 기반으로 한 결과로 적용 범위를 보다 확대하여 보다 일반성을 띠는 자료를 도출할 필요가 있으며, 이를 통해 국토 이용에 따른 오염원 발생변화를 보다 명확히 할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Candela, A, Freni, G, Mannina, G, and Viviani, G (2009). Quantification of diffuse and concentrated pollutant loads at the watershed-scale: an Italian case study, *Water Science & Technology*, 59(11), pp. 2125–2135.
- Jeon, JH, Jang, TK, Hwang, HS, Choi, DH, and Kim, TD (2010). Characterization of Nonpoint Source Pollutant Loads from the Nakdong, *J. of Korean Society of Urban Environment*, 10(3), pp. 203–211. [Korean Literature]
- Han, KY, Noh, JW, Kim, JS, and Lee, CH (2012). Application of Stochastic Optimization Algorithm for Waste Load Allocation in the Nakdong River Basin, Korea. *KSCE J. of Civil engineering*, 16(4), pp 650–659.
- Han, YH (2015). *Effect Analysis of Nonpoint Source by the Change of Load Unit in Han River Basin of Gangwon Province*, Gangwon Development Institute Report. [Korean Literature]
- Kang, MJ, Rhew, DH, Choi, JY (2014). Policies and Research Trends on Non-point Source Pollution Management in Korea. *J. of Environmental Policy and Administration*, 22(4), pp. 141–161. [Korean Literature]
- NIER. (2012). *Measurement Method of Stormwater Outflow*. [Korean Literature]
- NIER (2014). *Technical guidelines for TMDLs*, 11-1480523-001918-01. [Korean Literature]
- Orr, P, Colvin, J, and King, D (2007). Involving stakeholders in integrated river basin planning in England and Wales, *Water Resources Management*, 21(1), pp. 331–349.
- USEPA (2005). *National management measures to control nonpoint source pollution from forestry*, EPA-841-B-05-001. EPA, Office of Water, Washington, DC.
- Vanderbei, RJ (2001). *Linear Programming: Foundations and Extensions*. Springer Verlag.
- Vergura, J, and Jones, R (2000). *The TMDL Program: Land Use and Other Implications*, Texas Institute for Applied Environmental Research, Tarleton State University.
- Wang, JL, and Yang, YS (2008). An approach to catchment-scale groundwater nitrate risk assessment from diffuse agricultural sources: a case study in the Upper Bann, Northern Ireland, *Hydrological Processes*, 22(21), pp. 4274–4286.
- Yang, YS, and Wang, L (2010). A review of modelling tools for implementation of the EU Water Framework Directive in handling diffuse water pollution, *Water Resources Management*, 24(9), pp. 1819–1843.