

통계적 분석 방법을 이용한 국가지하수수질측정망의 오염 등급 정량화 및 평가

윤희성¹ · 배광옥² · 이강근^{2*}

¹한국지질자원연구원

²서울대학교 지구환경과학부

Quantification and Evaluation of Groundwater Quality Grade by Using Statistical Approaches

Heesung Yoon¹ · Gwang-Ok Bae² · Kang-Kun Lee^{2*}

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

ABSTRACT

This study suggests a method to grade groundwater quality quantitatively using statistical approaches for evaluating the quality of groundwater in wells included in the Groundwater Quality Monitoring Network (GQMN). The proposed analysis method is applied to GQMN data from 2001 to 2008 for nitrate nitrogen, chloride, trichloroethylene, potential of hydrogen (pH), and electrical conductivity. The analysis results are obtained as groundwater quality grades of the groundwater representing each of the monitoring stations. The degree of groundwater contamination is analysed for water quality parameters, district, and usage. The results show that the degree of groundwater contamination is relatively high by nitrate nitrogen, bacteria and electrical conductivity and at Seoul, Incheon, Gwangju, Gyeonggi-do and Jeollado. The degree of contamination by nitrate nitrogen and trichloroethylene is especially high when the groundwater is used for agricultural and industrial water, respectively. It is evaluated that potable groundwater in GQMN is significantly vulnerable to nitrate nitrogen and bacteria contamination.

Key words : Groundwater Quality Monitoring Network, Statistical approach, Groundwater quality grade, Degree of contamination

1. 서 론

우리나라는 2008년 말 기준 전국 약 134만개의 관정에
서 연간 약 37억 m³의 지하수를 이용하고 있으며 관정
개소수와 지하수 이용량은 계속 증가하고 있는 추세이다
(국가지하수정보센터, 2010). 지하수는 한번 오염되면 회
복하기 위해 많은 비용과 시간이 필요하기 때문에 지하수
보전을 위한 체계적이고 지속적인 노력이 요구된다. 환경
부에서는 전국적인 지하수 수질 현황과 변화를 파악하여
지하수수질을 보전하고 관련 정책 수립을 위한 기초 자료
를 확보하기 위해 1999년 이후 지하수수질측정망을 설치·
운영하고 있으며 매년 수질기준 초과율을 중심으로 수질
분석 결과를 발표하고 있다. 지하수수질측정망은 우리나

라 지하수 수질에 대한 방대한 자료를 제공하고 있지만
이를 이용한 연구는 현재까지 많이 이루어지지 않았다. 박
정구 외(2007)는 지하수수질측정망 지점에 대한 관정 현
황 평가에 대한 연구를 수행하였고 안주성 외(2007)는 국
내 지하수의 비소 산출양상에 대한 연구에서 지하수수질
측정망 자료를 이용하였다. 지하수수질측정망 자료를 활
용하여 우리나라 지하수수질 감시 및 보전에 기여하기 위
해서는 측정된 농도 변화 자료들을 바탕으로 오염의 정도
를 정량적으로 제시하는 것이 무엇보다 중요하다.

지하수 오염도의 정량화는 지하수 오염 취약성 지수 분
포도 작성과 관련하여 많은 연구가 진행되었다. 이는 수
리지질학적 요소를 이용하여 오염가능성을 평가하는 광역
적 분석 방법으로 이와 관련하여 DRASTIC(Aller et al.,

*Corresponding author : kkleee@snu.ac.kr

원고접수일 : 2011. 7. 15 심사일 : 2011. 7. 28 게재승인일 : 2011. 7. 28

질의 및 토의 : 2012. 4. 30 까지

1987), SINTACS(강진희와 박은규, 2010; Civita, 1994; Edet, 2004; Al-Amoush et al., 2010), GOD(Foster, 1987; Mendoza and Barmen, 2006), 등과 같은 다양한 지수산정법이 개발되고 GIS(Geographic Information System)와 연계하여 활용되어왔다. 특히 DRASTIC은 미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서 개발된 분석 시스템으로 다양한 지역에 대한 적용 연구(이사로 · 김윤중, 1996; 함세영 외, 2004; Babiker et al., 2005; Wen et al., 2009), 수정된 모형의 개발 및 적용 연구(Guo et al., 2007; Gomezdelcampo and Dickerson, 2008; Sinan and Razack, 2009), 수치모델과의 연계 연구(이현주 외, 2008; Yu et al., 2010) 등 국내 · 외에서 가장 많은 연구가 진행되었다. 이러한 방법은 최근 빠르게 전산화되고 있는 수리지질학적 요소의 데이터베이스를 이용하여 광역적 오염가능성을 제시할 수 있고 계산 과정이 단순하다는 장점이 있으나 실제 농도 관측값을 활용하지 않아 그 효율성을 검증하기 어렵고 가중값 결정과 관련된 주관적 요소가 많아 불확실성이 크다는 제한점이 있다.

농도 관측 자료를 이용하여 오염지수를 산정하는 방법으로는 농도값을 구간에 따라 분류하여 지수화 하거나(Pusatli et al., 2009) 수질 기준에 대한 비율을 이용하여 지수화 하는 방법이 연구되어왔다(이병대 외, 2007; Backman et al., 1998; Rapant et al., 1999; Vasanthavigar et al., 2010). 이와 같은 방법은 대상 지역의 현장 측정 자료를 바탕으로 오염도를 평가한다는 점에서 신뢰성이 높지만 대부분 단일 지점에서의 농도값을 이용하는 점과 농도의 시간적 경향성을 고려할 수 없다는 제한점이 있다.

본 연구에서는 환경부에서 운영하는 지하수수질측정망의 농도변화자료를 통계적으로 분석하여 오염도와 경향성을 파악하고 오염지수와 등급을 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위하여 지하수수질측정망의 각 지점별 자료에 대해 수질기준 초과횟수 조사, 평균농도분석 및 경향성분석을 수행하고 분석결과를 이용하여 지하수수질등급을 평가하는 방법을 제시하였다. 또한 이를 바탕으로 항목, 지역, 용도, 음용별 지하수 오염도를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 지하수수질측정망 자료

지하수수질측정망은 2008년 기준으로 환경청에서 관리하는 오염우려지역 781지점, 지방자치단체에서 관리하는 일반지역 1240지점과 국토해양부에서 관리하는 국가지하수관측망 478지점 등 총 2499지점에 대해 4-5월의 상반

기와 9-10월의 하반기의 연 2회에 걸쳐 수질측정이 수행되고 있다. 이 중 오염우려지역과 일반지역은 1999년부터, 국가지하수관측망은 2005년부터 수질측정이 수행되어왔다. 지하수수질측정망의 측정항목은 일반오염물질 5개 항목과 특정유해물질 15개 항목으로 구성되어있다. 일반오염물질 5개 항목은 수소이온농도, 대장균수, 질산성질소, 염소이온, 일반세균이다. 오염우려지역에서는 대장균수 대신 전기전도도를 측정한다. 특정유해물질은 카드뮴, 비소, 시안, 수은, 유기인, 페놀, 납, 6가크롬, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 1,1,1-트리클로로에틸렌, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌이다. 측정 결과는 토양지하수정보시스템(sgis.nier.go.kr)에서 제공하고 있다. 환경부의 2008년 지하수수질측정망 운영결과 보고서에 따르면 4,827개의 조사 시료 중 6.9%인 335개가 수질기준을 초과하여 2007년 초과율(5.4%)보다 증가한 것으로 조사되었다(환경부, 2008; 환경부, 2009).

본 연구에서는 환경부의 2007년도와 2008년도 지하수수질측정망 운영결과 보고서 기준으로 다른 항목들에 비해 수질기준 초과 빈도가 높은 일반세균(BT), 질산성질소(NO₃-N), 염소이온(Cl⁻), 수소이온농도(pH), 트리클로로에틸렌(TCE)을 분석 대상으로 하였다. 또한 전기전도도(EC)의 경우 오염우려지역에서만 측정되고 수질기준이 없어 수질기준 초과 항목에 없지만 전반적인 이온농도의 지시인자로서 유용하고 높은 값이 관측되는 지점이 많은 것으로 조사되어 분석 대상에 포함시켰다. 각 항목에 대한 분석 기준은 먹는 물 수질기준을 적용하였고(Table 1), 수질기준이 없는 전기전도도의 경우 일반수 범위를 고려하여 500 μS/cm으로 설정하였다(한정상, 1998). 각 항목에 대해 2001년부터 2008년까지의 최대 16회의 수질측정 자료를 분석 하였다. 2004년부터 측정이 시작된 일반세균의 경우 10회의 수질측정 자료를 분석하였다. 측정 지점은 오염우려지역과 일반지역에 대한 2021지점 중 관측 주소지가 자주 변경되어 분석이 어렵다고 판단된 15개 지점을 제외한 2006개 지점을 고려하였다.

2.2. 연구 방법

본 연구에서는 지하수수질측정망의 항목별 오염도를 정량화하기위하여 다음의 세 가지 분석방법을 수행하고 각 분석방법을 오염지시인자로 설정하였다.

2.2.1. 수질기준 초과 회수 조사

각 지점별 측정 농도값 중 해당 항목의 수질기준을 초과한 횟수를 조사하고 지정된 횟수를 넘을 경우 오염을

Table 1. Groundwater quality standards

Measurement item	NO ₃ N	Cl ⁻	TCE	pH	BT	EC
Water quality standard	10 mg/l	250 mg/l	0.03 mg/l	5.8-8.5	100 cfu/ml	500 μS/cm

지시하도록 하였다. 관측횟수가 일정하지 않은 경우 오염 지시 초과횟수를 관측횟수의 일정 비율로 결정하는 것이 타당할 수 있다. 본 연구에서 사용된 자료는 최대 16회(일 반세균의 경우 10회)의 관측자료이지만 미측정된 자료나 이상자료가 다수 존재하고 기간 내 측정 지점이 변경된 부분이 많아 실제로 고려할 수 있는 자료의 관측 횟수는 이보다 적은 경우가 많다. 따라서 적절한 비율을 결정하여 적용하는데 제한점이 있다. 이후 보다 많은 자료를 활용하게 되는 경우 관측 횟수의 일정비율을 적용하는 연구가 수행되어야 할 것이다. 본 연구에서는 가장 엄격한 기준을 적용하여 초과횟수가 1이상이면 오염을 지시하는 것으로 하였다.

2.2.2. 평균 농도 분석

수질기준 초과횟수 조사만으로는 조사 기간 동안의 농도 분포가 오염 가능성을 가지는지를 판단할 수 없다. 본 연구에서는 각 지점별 측정 농도의 평균과 표준오차를 계산하여 평균 농도의 95% 신뢰구간을 결정하고(식 (1)) 수질기준과 신뢰구간을 비교하여 오염을 지시하는 것으로 판단하였다. 즉, 평균 농도 신뢰구간이 상한선이 수질기준 보다 높은 경우를 오염을 지시하는 것으로 판단하였고, 수질기준이 구간으로 존재하는 pH의 경우는 그 반대의 경우도 고려하였다.

$$\left(\bar{X} - 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \tag{1}$$

\bar{X} 는 농도 평균, σ 는 농도 표준편차, n 은 관측횟수를 나타낸다.

2.2.3. 경향성 분석

해당 지역의 오염도를 판단하는데 있어 농도의 크기에 대한 분석 뿐 아니라 시간에 따른 농도의 경향성을 조사하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 농도의 경향성분석을 위해 Sen의 경향성 분석법(Trend test)을 적용하였다. Sen의 경향성 분석법은 비모수적 분석 방법으로 실제 관측값을 그대로 적용하지 않고 구간 기울기 값들의 서열을 이용함으로써 이상값이나 결측값의 영향을 크게 받지 않는다. 이러한 Sen의 경향성 분석법은 국내 · 외 지하수 환경과 관련된 많은 연구에 적용되어왔다(이진용 외, 2006;

최현미 · 이진용, 2009; Lee et al., 2007; Naftz et al., 2008; D'Alessandro et al., 2010).

Sen의 경향성 분석을 위하여 우선, 각 시간 간격에 대한 지하수 농도의 기울기(Q)를 식 (2)와 같이 계산한다.

$$Q = \frac{x_{i'} - x_i}{i' - i} \tag{2}$$

$x_{i'}$ 는 시간 i' 에서의 농도, x_i 는 시간 i 에서의 농도, i' 는 시간 i 이후의 시간을 나타낸다.

식 (2)와 같은 계산을 통해 n 개의 농도 자료에 대해 N' 개의 Q 가 계산된다(식 (3)).

$$N' = \frac{n(n-1)}{2} \tag{3}$$

이 후, Q 를 크기순으로 정리하고 식 (4)와 같이 Q 의 중앙값을 기울기 예측값(Q')로 결정한다.

$$Q' = Q_{[(N'+1)/2]} \quad N' : \text{홀수}$$

$$= \frac{1}{2}(Q_{[N'/2]} + Q_{[(N'+2)/2]}) \quad N' : \text{짝수} \tag{4}$$

Sen의 경향성 분석법에서는 신뢰구간의 결정을 위해 식 (5)와 같은 Mann-Kendall 통계값의 분산 추정값 ($VAR(S)$)을 이용하게 된다.

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p-5) \right] \tag{5}$$

n 은 자료 수, t_p 는 p 번째 값의 반복 자료 수, q 는 반복 자료가 존재하는 횟수를 나타낸다.

오차 허용률 α 에 대한 신뢰구간의 간격(C_α)은 양측검증 Z 통계값 $Z_{1-\alpha/2}$ 값을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$C_\alpha = Z_{1-\alpha/2} \times \sqrt{VAR(S)} \tag{6}$$

본 연구에서는 95% 신뢰구간을 고려하여 $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 을 이용하였다. 식 (6)을 이용하여 농도 기울기의 신뢰구간의 양 끝 값에 대한 순위($M1, M2$)는 식 (7)과 같다.

$$M1 = \frac{N' - C_\alpha}{2}; \quad M2 = \frac{N' - C_\alpha}{2} + 1 \tag{7}$$

$M1$ 과 $M2$ 에 대한 Q' 를 구하고 이 신뢰구간 내에 0이 들어가지 않으면 계산된 농도의 경향성 Q 는 통계적으로 0과 같지 않다는 의미를 지니게 되고 경향성을 인정할 수 있다($M1, M2$). 신뢰구간 내에 0이 포함된다면 계산된 기울기가 통계적으로 0과 다르지 않다는 의미이고 경향성이 없다고 판단하게 된다(Maurice and Kendall, 1955; Sen, 1968; Gilbert, 1987).

이와 같은 방법으로 경향성분석을 수행하여 농도기울기가 증가한다고 분석되는 경우 오염을 지시하는 것으로 판단하였다. 단, 수소이온농도의 경우 농도기울기가 증가하거나 감소하는 경우 모두 오염을 지시하는 것으로 판단하였다.

2.2.4. 지하수 수질 등급 분류

본 연구에서는 수질기준 초과횟수 조사, 평균농도분석, 경향성분석의 세 가지 방법을 오염지시인자들로 설정하였다. 각 오염지시인자 오염을 판단하는 횟수를 오염지수로 정의하고 오염지수에 따라 지하수수질등급을 '안전', '오염가능', '오염', '오염심각'의 네 가지로 분류하였다(Table 2). 단순히 농도의 초과율이나 평균값을 이용하는 것은 복잡하고 다양한 전국적인 오염 상태를 충분히 고려하기 어려운 한계점이 있다. 이와 같이 세 가지 분석법에 의한 오염지시인자들의 조합을 활용하여 수질등급을 분류함으로써 다양한 오염 이력 및 가능성을 보다 효과적으로 고려할 수 있다.

3. 결 과

3.1. 분석 예시

Fig. 1과 Table 3은 지하수 수질 관측지점의 농도변화 자료와 앞서 기술한 분석방법에 의한 오염등급 분류 과정의 예시를 보여준다. Fig. 1(a)는 경상북도 청도군 금천면 갈지리 797번지 지점의 질산성질소에 대한 자료로 수질기준 초과횟수 조사, 평균농도분석, 경향성분석 결과 모두 오염을 지시하여 오염지수 3인 '오염심각' 등급으로 분류하였다. Fig. 1(b)는 경기도 안성시 대덕면 소현리 420번지 지점의 TCE에 대한 자료로 오염지시인자 중 수질기준 초과횟수 조사에서만 오염을 지시하여 오염지수 1인 '오염가능' 등급으로 분류하였다.

3.2. 오염 등급 분류

Table 4에서는 각 분석방법의 오염 지시율, 즉 전체분석 지점 중 오염을 판단한 지점의 비율을 항목별로 표시하였

Table 2. Groundwater quality classification that is suggested in this study

Number of methods which indicate the contamination	Water quality grade	Contamination index
0	Clean	0
1	Possibly contaminated	1
2	Contaminated	2
3	Seriously contaminated	3

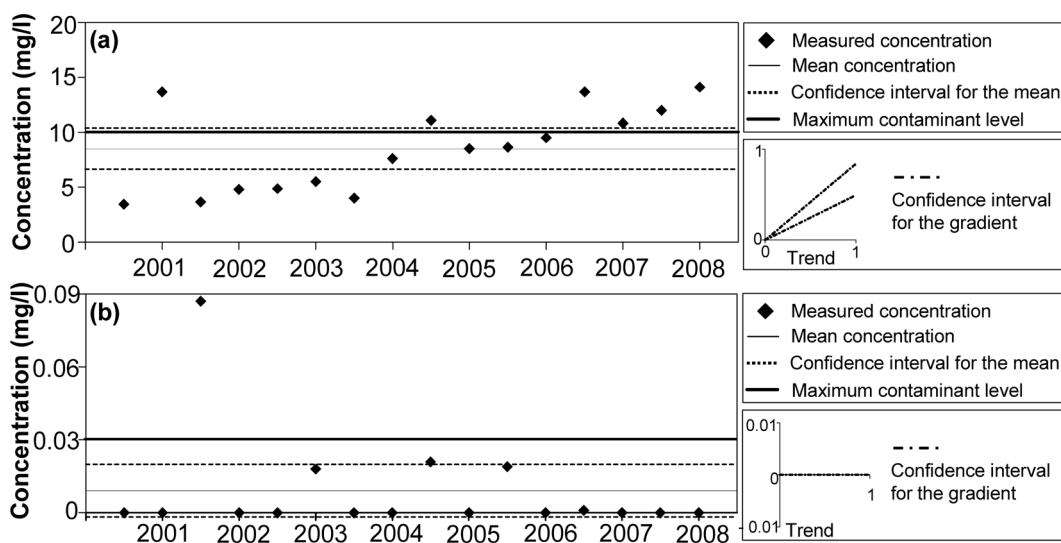


Fig. 1. Examples of groundwater quality data of GQMN; (a) nitrate nitrogen at ST0201, (b) TCE at FH1202.

Table 3. Examples of groundwater quality classification process

Measurement item	NO ₃ N	TCE
Location code	ST0201	FH1202
Frequency of water quality standard violations	6	1
Average concentration analysis	Violation	No violation
Sen's trend test	Up trend	No trend
Number of indications (Contamination index)	3	1
Grade	Seriously contaminated	Possibly contaminated

Table 4. The rate of contamination indication for each three statistical analyses

Statistical Analysis	NO ₃ N	Cl ⁻	TCE	pH	BT	EC
Frequency of water quality standard violations	33.9%	2.7%	4.8%	4.6%	20.8%	54.2%
Average concentration analysis	11.5%	1.1%	2.8%	0%	13.8%	31.7%
Sen's trend test	10.0%	10.8%	0.3%	9.5%	2.2%	21.3%

다. 수질기준 초과횟수 조사와 평균농도분석 결과 질산성 질소, 일반세균, 전기전도도에 대한 오염 지시율이 높은 것으로 나타났다. 경향성분석 결과 전기전도도에 대한 오

염 지시율이 가장 높았고 질산성질소, 염소이온, 수소이온 농도가 약 10% 내외의 오염 지시율을 보여주었다. 이러한 수질분석결과를 이용하여 6개 항목에 대한 2006개 지

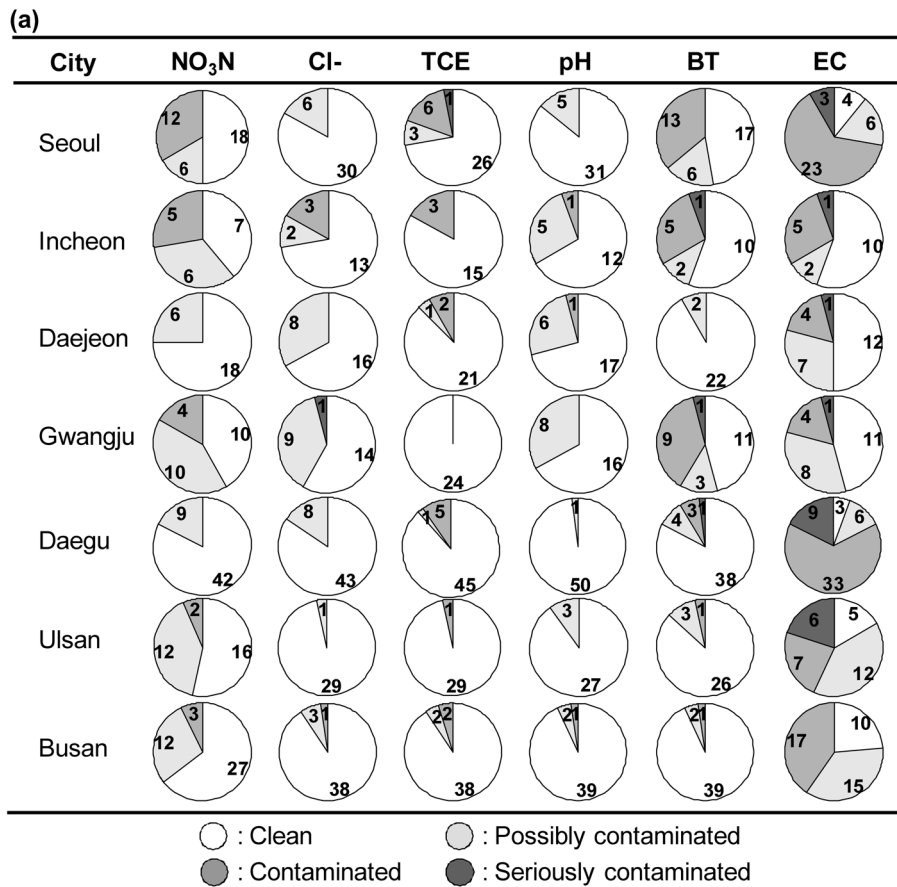


Fig. 2. Classification of groundwater quality in the area where imminent contamination is expected: (a) metropolitan city; (b) province.

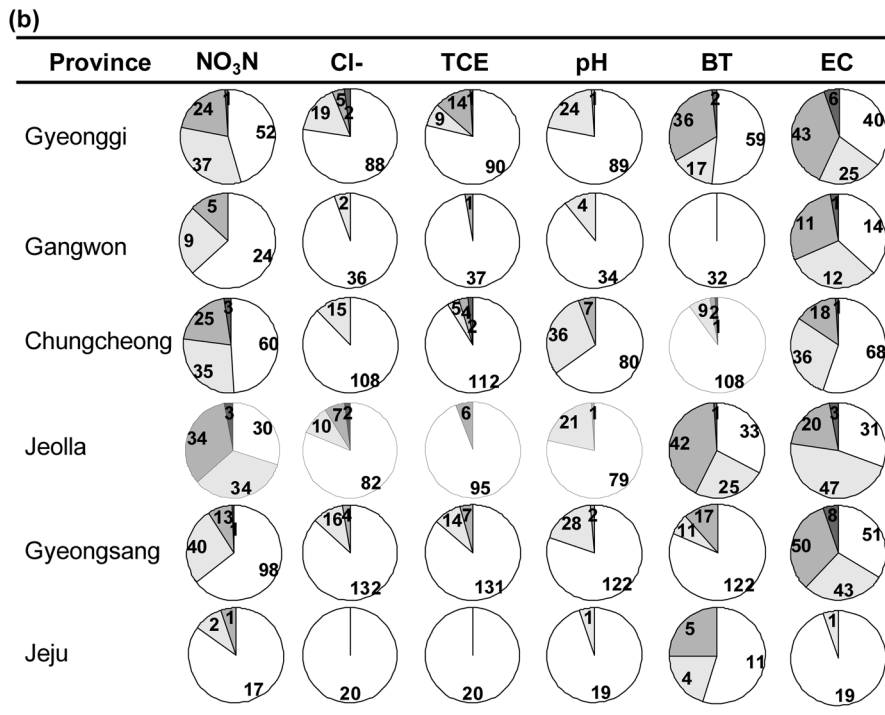


Fig. 2. continued

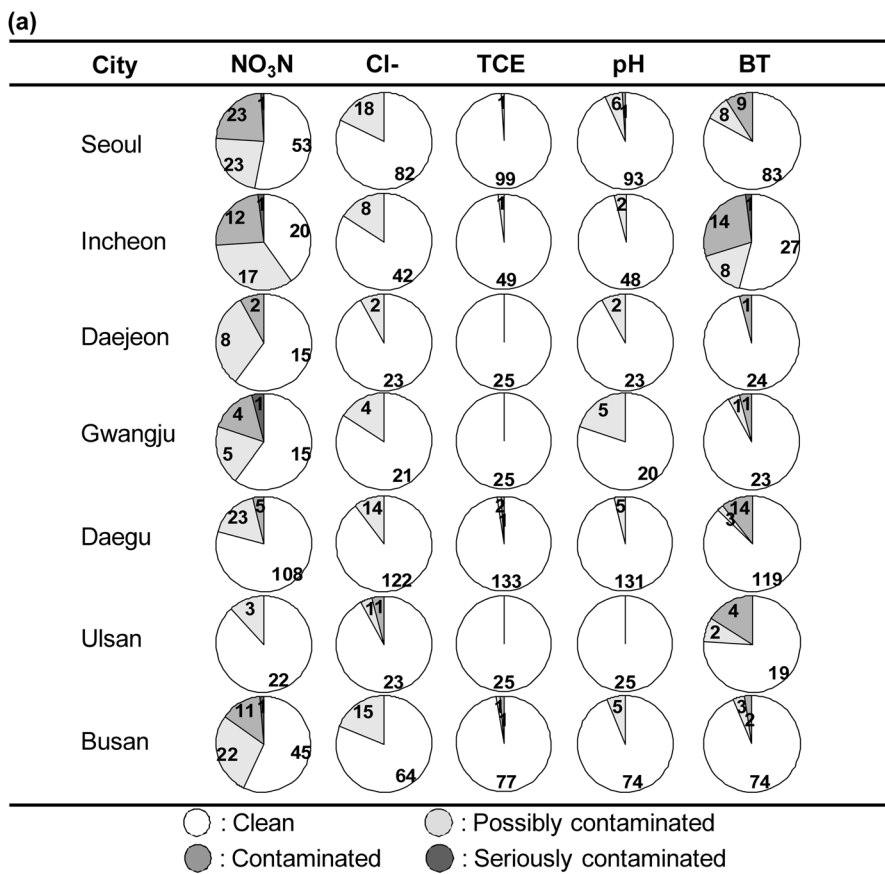


Fig. 3. Classification of groundwater quality in general area: (a) metropolitan city; (b) province.

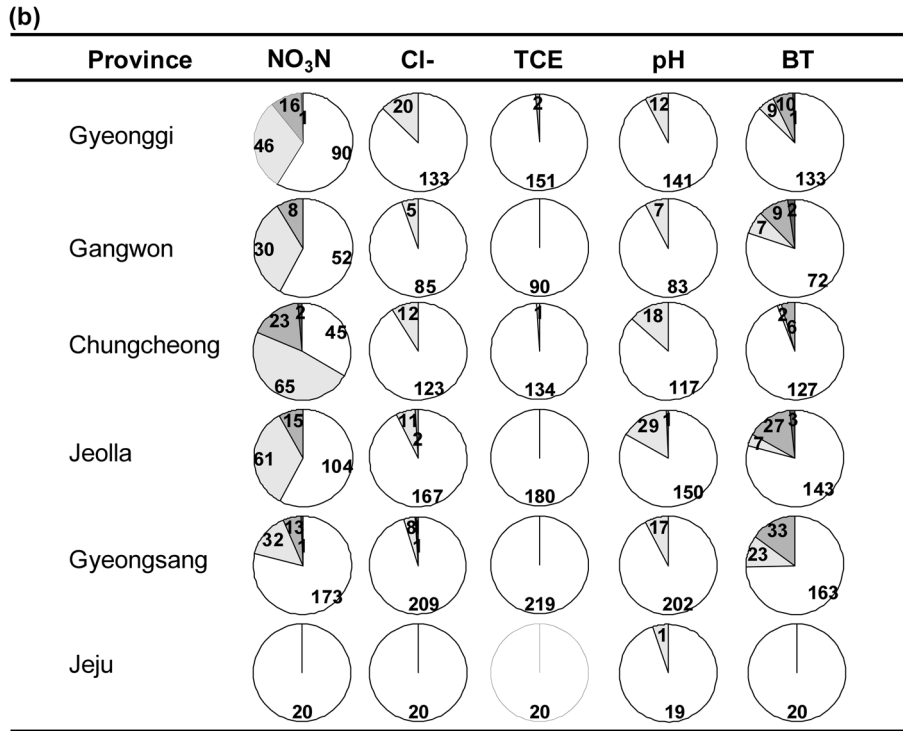


Fig. 3. continued

점의 오염등급을 결정하였다. Fig. 2와 3은 각각 오염우려 지역과 일반지역에 대한 (a)도시별, (b)행정구역별 오염등급 분포를 보여준다. 오염등급 분석 결과 전반적으로 오염우려지역이 일반지역보다 높은 오염도를 나타내고 있고 도시와 행정구역 간의 뚜렷한 차이는 보이지 않았다.

3.3. 오염 지수 분석

전체 지점에 대한 수질분석 결과를 바탕으로 항목, 지역, 용도, 음용여부별 평균오염지수를 비교·분석하였다. Fig. 4(a)는 전체자료에 대한 항목별 평균오염지수를 보여준다. 오염우려지역의 전기전도도의 평균오염지수가 1.00으로 가장 높았고 질산성질소와 일반세균이 각각 0.59와 0.36으로 비교적 높았다. 각 도시 및 행정구역의 모든 항목에 대한 평균오염지수를 살펴보면 도시 중 서울, 인천, 광주와 행정구역 중 경기, 전라도가 상대적으로 높은 평균오염지수를 보여주는 것을 알 수 있다(Fig. 4(b)).

지하수 사용 용도별 오염정도를 파악하기위해 각 항목에 대한 생활, 농업, 공업용별로 평균오염지수를 조사하였다(Fig. 5). 질산성질소의 경우 농업용으로 이용되는 지점에서의 평균오염지수가 0.84로 상대적으로 높았고 TCE의 경우 전체적인 평균오염지수는 0.07로 높지 않았지만 공업용으로 이용되는 경우의 평균오염지수는 0.35로 지하수

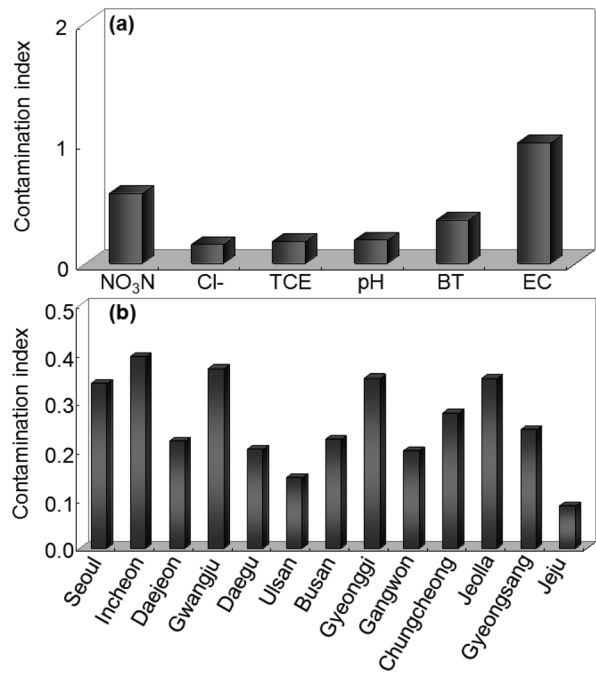


Fig. 4. The result of contamination index analyses: (a) average contamination index for each measurement item; (b) average contamination index in each metropolitan city and province.

오염과 용도와의 상관관계가 높은 것을 지시하였다. 전기전도도의 경우 전체적으로 0.90 이상의 높은 평균오염지

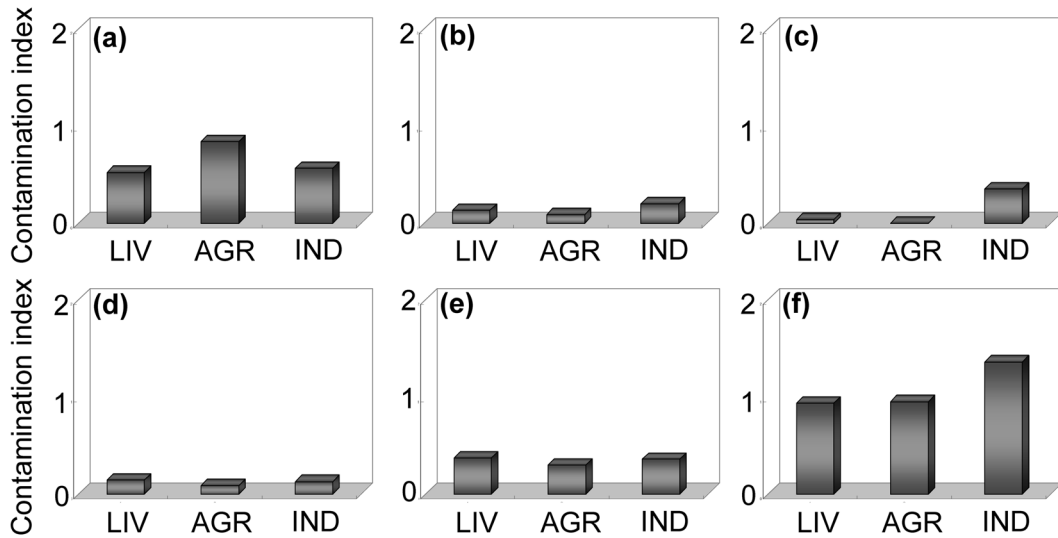


Fig. 5. Average contamination index for groundwater usage. LIV is living water, AGR is agricultural water and IND is industrial water: (a) NO₃N; (b) Cl⁻; (c) TCE; (d) pH; (e) BT; (f) EC.

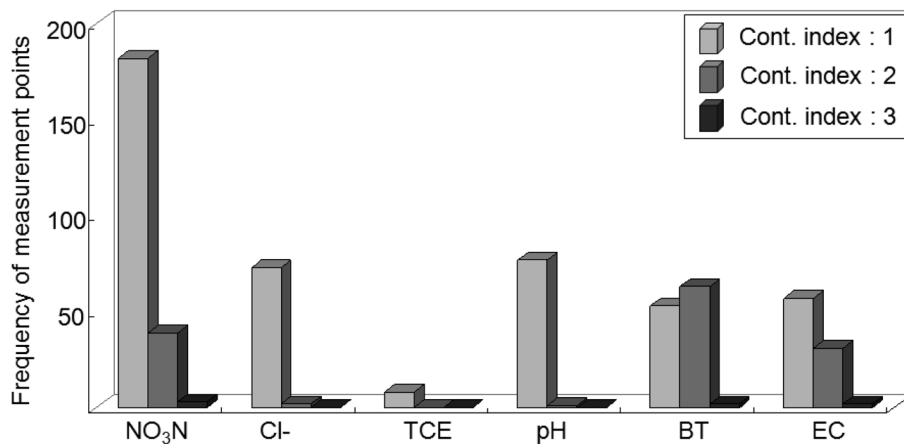


Fig. 6. Frequency of contaminated measurement points of potable groundwater.

수를 보여주었고 공업용으로 이용되는 지점의 경우 1.36으로 가장 높았다. 염소이온, 수소이온농도, 일반세균수의 경우 용도별로 뚜렷한 차이를 보여주지는 않았다.

지하수를 음용수로 이용할 경우 지하수 오염이 보다 큰 위험을 줄 수 있기 때문에 각 항목에 대한 오염 취약성을 조사할 필요가 있다. 이에 수질분석 결과 중 먹는물 용도로 이용되는 경우의 자료만을 분리하여 오염지수가 1 이상인 지점들 수를 조사하였다(Fig. 6). 조사 결과 음용수로 이용되는 지점은 총 723개 지점이었고 질산성질소와 일반세균에 대해 오염지수가 1 이상인 지역이 각각 224개 지점과 118개 지점으로 높게 나타났다. 오염우려지역에 대해서만 측정된 전기전도도의 경우 음용수로 이용하

고 있는 186지점들 중 90 지점에서 오염지수가 1 이상으로 나타났다. 특히 일반세균의 경우 ‘오염인정’에 해당하는 오염지수가 2인 지점이 63개 지점이나 되어 오염에 취약함을 나타냈다.

3.4. 민감도 분석

지하수수질분석 중 평균농도분석과 경향성분석에서 각각 농도 평균값과 농도기울기 추정값에 대한 95% 신뢰도에 해당하는 신뢰구간을 이용하였다. 본 연구에서는 분석방법의 신뢰구간이 오염등급분류에 미치는 영향을 살펴보기 위해 민감도분석을 수행하였다. 각 분석방법의 신뢰도를 70%에서 99%까지 증가시키며 평균오염지수의 변화를

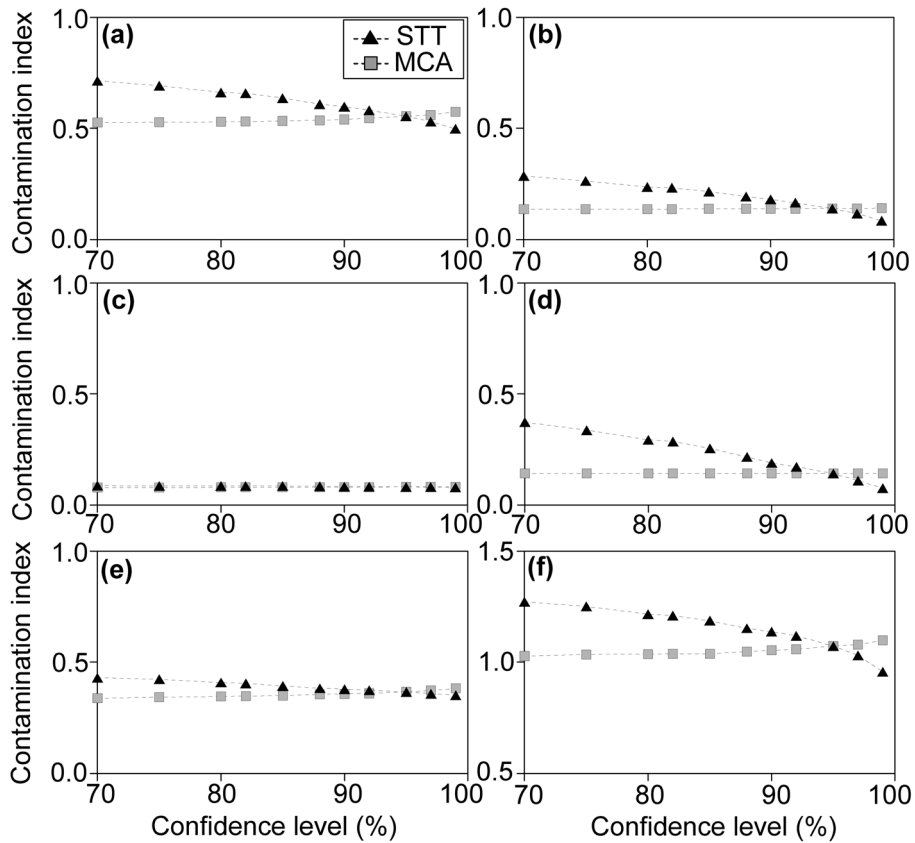


Fig. 7. The result of sensitivity analyses for confidence levels of statistical methods. STT denotes Sen's trend test and MCA average concentration analysis: (a) NO₃N; (b) Cl⁻; (c) TCE; (d) pH; (e) BT; (f) EC.

관찰하였다(Fig. 7). 민감도분석 결과 평균농도분석에 비해 경향성분석에 대한 신뢰도가 평균오염지수 결정에 높은 민감도를 보이는 것으로 나타났다. 특히 수소이온농도와 전기전도도의 경우 높은 민감도를 보여준다.

4. 토의 및 결론

본 연구는 통계적 분석방법을 이용하여 지하수 오염도를 정량화하는 방법을 제시하고 이를 지하수수질측정망 자료에 적용하였다. 이를 통하여 얻게 된 결과에 대한 고찰과 결론은 다음과 같다.

1) 각 항목에 대한 분석 결과에서 오염우려지역에서만 측정되는 전기전도도를 제외하면 전반적으로 질산성질소와 일반세균에 대한 오염도가 큰 것으로 나타났다. 전기전도도의 경우 수질기준이 없어 임의의 기준을 설정하였는데 모든 분석방법에 대해 가장 큰 오염 지시율을 보여주었다. 전기전도도는 지하수의 전체적인 이온농도의 정도를 효과적으로 알 수 있는 지표로 활용가능하고 현재

오염우려지역에서 높은 오염도를 보여주고 있으므로 일반 지역까지 측정범위를 넓히는 것이 필요하다고 판단된다. 염소이온과 수소이온농도의 경우 전체적인 오염도는 크지 않지만 경향성 분석 결과 10% 내외의 오염 지시율을 보여 이후 지속적인 관찰이 필요하다.

2) 지역별로 전체 항목 평균오염지수를 비교한 결과 도시 중 서울, 인천, 광주와 행정구역 중 경기, 전라도가 상대적으로 오염도가 높았고 제주도의 평균오염지수가 가장 낮았다. 제주도는 측정지점 수가 40개 지점으로 가장 적었는데 이후 측정지점 수를 늘릴 필요가 있다고 판단된다.

3) 지하수 용도별 평균오염지수를 조사한 결과 질산성 질소와 TCE가 각각 농업용과 공업용으로 사용되는 경우 높은 오염지수를 나타내고 있어 이후 지하수 수질을 효과적으로 관리하는데 토지이용도와 연계된 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4) 지하수를 음용수로 이용하는 경우의 오염지수별 관측지점 수에 대해 분석한 결과 질산성질소와 일반세균이 오염에 가장 취약한 것으로 조사되었다.

본 연구에서 제시한 연구방법과 결과들이 지하수수질측정망을 효과적으로 관리하고 오염도를 정량적으로 파악하는데 도움이 될 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 환경부의 토양·지하수오염방지기술개발사업[GAIA Project] (과제번호: G110-17001-0006-0)의 연구비 지원을 받아 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- 강진희, 박은규, 2010, DRASTIC과 SINTACS 모델의 비교적용에 의한 부여읍 일대의 지하수 오염 취약성 평가, *지하수토양환경*, **15**(5), 32-39.
- 박정구, 김락현, 이진용, 최동혁, 김태동, 2007, 우리나라 지하수 수질측정망 현황 평가 및 개선을 위한 고찰, *지하수토양환경*, **12**(6), 92-99.
- 안주성, 고경석, 전철민, 2007, 국내 지하수의 비소산출양상, *지하수토양환경*, **12**(5), 64-72.
- 이병대, 윤육, 성익환, 2007, 울산지역 토지이용도에 따른 지하수 수질 및 오염특성, *지하수토양환경*, **12**(6), 78-91.
- 이사로, 김윤중, 1996, DRASTIC SYSTEM을 이용한 지하수 오염 가능성 및 위험 분석 연구, *한국GIS학회*, **4**(1), 1-11.
- 이진용, 이명재, 이재명, 안경환, 원종호, 문상호, 조민조, 2006, 국가 지하수관측소 지하수위, 전기전도도 및 수온자료에 대한 모수적 및 비모수적 변동 경향성 분석, *지하수토양환경*, **11**(2), 56-67.
- 이현주, 박은규, 김강주, 박기훈, 2008, DRASTIC 모델 및 지하수 수치모사 연계 적용에 의한 부여읍 일대의 지하수 오염 취약성 평가, *지하수토양환경*, **13**(1), 77-91.
- 최현미, 이진용, 2009, 제주도 지하수 관측망 수위에 대한 모수 및 비모수 변동경향 분석, *지하수토양환경*, **14**(5), 41-50.
- 한정상, 1998, *지하수환경과 오염*, 박영사, 서울, p. 1017.
- 환경부, 2008, 2007년 지하수 수질측정망 운영결과, 환경부.
- 환경부, 2009, 2008년 지하수 수질측정망 운영결과, 환경부.
- 함세영, 정재열, 김무진, 김인수, 황한석, 2004, DRASTIC과 지하수 수질에 의한 창원시 지하수 오염취약성 평가, *자원환경지질*, **37**(6), 631-645.
- Al-Amoush, H., Hammouri, N.A., Zunic, F., and Salameh, 2010, Intrinsic vulnerability assessment for the alluvial aquifer in the northern part of Jordan Valley, *Water Resour. Manage.*, **24**(13), 3461-3485.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., and Hackett, G., 1987, DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. EPA/600/2-87/035, US Environmental Protection Agency, Washington, DC, p. 455.
- Babiker I.S., Mohamed, A.A., Mohamed, Hiyama, T., and Kato, K., 2005, A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan, *Sci. Total Environ.*, **345**(1-3), 127-140.
- Backman, B., Bodis, D., Lahermo, P., Rapant, S., and Tarvainen, T., 1998, Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia, *Environ. Geol.*, **36**(1-2) 55-64.
- Civita, M., 1994, Vulnerability maps of aquifer subjected to pollution: theory and practice (in Italian), Pitagora Editrice, Bologna.
- D'Alessandro, W., Bellomo, S., Bonfanti, P., Brusca, L., and Longo, M., 2010, Salinity variations in the water resources fed by the Etnan volcanic aquifers (Sicily, Italy): natural vs. anthropogenic causes, *Environ. Monit. Assess.*, Article in press.
- Edet, A.E., 2004, Vulnerability evaluation of a coastal plain sand aquifer with a case example from Calabar, southeastern Nigeria, *Environ. Geol.*, **45**(8), 1062-1070.
- Foster, S.D.D., 1987, Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, In: van Duijvenbooden, W., van Waegeningh, H.G. (Eds.), *Vulnerability of soils and groundwater to pollution*, TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proceedings and information, **38**, 69-86.
- Gilbert, R.O., 1987, Statistical methods for environmental pollution monitoring, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, p. 320.
- Gomezdelcampo, E. and Dickerson, J.R., 2008, A modified DRASTIC model for siting confined animal feeding operations in Williams County, Ohio, USA, *Environ. Geol.*, **55**(8), 1821-1832.
- Guo, Q., Wang, Y., Gao, X., and Ma, T., 2007, A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination at basin scale: a case study in Taiyuan basin, northern China, *Environ. Geol.*, **52**(5), 923-932.
- Lee, J.Y., Moon, S.H., and Lee, K.K., 2007, Determining the condition of groundwater in evaluating the need for corrective measures: a case for the national groundwater-monitoring network in South Korea, *Hydrogeol. J.*, **16**(1), 123-137.
- Maurice, G. and Kendall, Sc.D., 1955, Rank correlation methods, Hafner Publishing Company, New York, NY, p. 196.
- Mendoza, J.A. and Barmen, G., 2006, Assessment of groundwater vulnerability in the Rio Artiguas basin, Nicaragua, *Environ. Geol.*, **50**(4), 569-580.
- Naftz, D.L., Bullen, T.D., Stolp, B.J., Wilkowske, C.D., 2008, Utilizing geochemical, hydrological, and boron isotopic data to assess the success of a salinity and selenium remediation project,

- Upper Colorado River Basin, Utah, *Sci. Total Environ.*, **391**(1), 1-11.
- Pusatli, O.T., Camur, M.Z., and Yazicigil, H., 2009, Susceptibility indexing method for irrigation water management planning: Applications to K. Menderes river basin, Turkey, *J. Environ. Manage.*, **90**(1), 341-347.
- Rapant, S., Raposova, M., Bodis, D., Marsina, K., and Slaninka, I., 1999, Environmental-geochemical mapping program in the Slovak Republic, *J. Geochem. Explor.*, **66**(1-2), 151-158.
- Sen, P.K., 1968, Estimate of the regression coefficient based on Kendall's tau, *J. Am. Stat. Assoc.*, **63**, 1379-1389.
- Sinan M. and Razack, M., 2009, An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco), *Environ. Geol.*, **57**(2), 349-363.
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Ganthi, R.R., Chidambaram, S., Anandhan, P., Manivannan, R., and Vasudevan S., 2010, Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India, *Environ. Monit. Assess.*, **171**(1-4), 595-609.
- Wen, X., Wu, J., and Si, J., 2009, A GIS-based DRASTIC model for assessing shallow groundwater vulnerability in the Zhangye Basin, northwestern China, *Environ. Geol.*, **57**(6), 1435-1442.
- Yu, C., Yao, Y., Hayes, G., Zhang, B., and Zheng, C., 2010, Quantitative assessment of groundwater vulnerability using index system and transport simulation, Huangshuihe catchment, China, *Sci. Total Environ.*, **408**(24), 6108-6116.