

국가 물 관리를 위한 한국형 토양수분량 관측시스템 설계



정재환

성균관대학교 수자원전문대학원 박사과정
Jhjeong15@skku.edu



최민하

성균관대학교 수자원전문대학원 교수
mhchoi@skku.edu

를 위한 기상 예측 모델, 홍수 예측, 농업 가뭄의 평가의 주요 변수일뿐만 아니라, 최근 사회적으로 큰 이슈가 되고 있는 황사, 미세먼지, 온실 가스 등의 예측 및 모니터링에서도 중요한 매개변수로 이용되고 있으며 수인성 질병 모델링에서도 사용되는 등 활용 범위가 매우 광범위하다(Kim et al., 2015; Schaufler et al., 2010; Komma et al., 2008; Sheffield et al., 2004).

토양수분의 중요성이 대두되면서 전 세계의 토양수분 관측 자료를 수집하고자 하는 노력이 있었으며, 현재 전 세계 여러 기관의 자발적인 참여를 통해 토양수분 관측자료를 서로 공유하는 데이터베이스인 ‘세계 토양수분 관측망(International Soil Moisture Network, ISMN)’이 있다(Dorigo et al., 2011). ISMN을 통해 제공되고 있는 전 세계 토양수분 관측 지점의 개수는 2,400개 이상이며 수집된 자료들은 새롭게 발사된 위성의 산출물 생산 및 검증과 같은 다양한 분야의 최첨단 연구에서 활용되고 있다. 그 중 한국의 토양수분량 관측 소로는 설마천 1개소와, 성균관대학교 5개소가 등록되어 총 6개소의 토양수분량이 제공되고 있다.

토양수분량을 국가 물 관리에서 직접 활용하게 되면서, 우리나라는 수자원의 효율적인 보전이용 개발 및 물 관련 재해의 경감 예방을 위한 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」을 시행하고 있으며, 해당 법률에서 ‘토양수분 함유량에 관하

1. 서론

지구상에 존재하는 전체 수량 중 약 0.0012%만을 구성하고 있는 토양수분은, 수량 관리를 주목적으로 하는 국가 물 관리 계획에서 오랫동안 외면 받아 왔다. 하지만 토양수분이 대기과 지표 사이에서 에너지, 탄소, 물의 상호교환 과정에서 중요한 역할을 하고 있음이 알려지면서 토양수분 연구에 관한 관심이 높아졌고, 2010년에는 세계 기상기후에서 필수 기후 변수(Essential Climate Variable, ECV)로 선정되는 등 수문 순환을 파악하는 핵심 인자로 여겨지고 있다(Koster et al., 2004; Jung et al., 2010). 토양의 상층부에 저장되어 있는 물을 의미하는 토양수분은 수자원 관리

여 과학적인 방법으로 관찰·측정·조사·분석하는 것'을 포함하고 있다. 2010년 「수문조사선진화 5개년계획」을 통해 25개 토양수분 관측 지점을 설치하면서, 전국적인 토양수분 관측망을 구축하고자 하는 국가적 차원의 시도가 이루어지고 있다. 하지만, 이러한 국가적 차원의 노력에도 불구하고 계측기술 및 방법 등이 아직 체계화되어 있지 않은 탓에 매우 제한적으로 운영되고 있는 실정이다. 따라서 관측소 설치 기준, 운영과 관측 자료의 품질관리 방법 등을 위한 체계적이고 일관적인 기준의 정립이 필요하다.

본 고에서는, 토양수분을 관측하는 다양한 방식의 방법들을 통해 최신 연구의 동향을 살펴보고, 기존의 토양수분 관측자료와 면(面) 단위의 토양수분을 산출하는 최신 기술을 함께 활용하여 토양수분 관측망을 설계하기 위한 연구 계획을 간략히 소개하고자 한다.

2. 토양수분 관측 연구 현황

토양 속에 존재하고 있는 수분의 함량을 직접적으로 측정한다는 것은 매우 어려운 일이다. 이를 측정하기 위해 채취된 토양시료를 실험실에서 건조시켜 중량의 차를 통해 수분 함량을 측정하는 방법 건조 중량법이 사용되었다(Reynolds, 1970). 하지만 토양 시료를 채취하고 실험실까지 운반하는 과정에서 실제 환경과의 변화가 발생할 수 있고, 기상환경 등에 의해 주기적인 관측이 불가능하므로 실질적으로 연구나 물 관리에 활용 가능한 자료를 생산하기 어렵다.

현재 기존의 토양수분 관측소에서 주로 사용하고 있는 방식은 대부분 유전율식 방법을 통해 토양수분을 간접적으로 계측하는 방식이다. 이는 TDR (Time Domain Reflectometry) 센서를 이용하거나 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 센서를 측정지점에 설치하는 방법으로, 토양수분을 측정하고자 하는 깊이에 설치할

수 있기 때문에 각 깊이에 따른 정확한 토양수분의 변동성을 관측할 수 있다. 그렇지만, 유전율식 센서의 특성상 공간적인 대표성을 갖는 자료를 획득하기에 어려움이 있기 때문에 다양한 연구에서 활용하기에는 많은 한계가 있다.

이러한 한계점을 개선 및 극복하기 위해 토양수분을 간접적으로 관측하는 다양한 방안들이 연구되고 있으며, 대표적으로는 인공위성을 활용하는 방법을 꼽을 수 있다. 위성 기반의 토양수분은 1978년 수동형 마이크로파 센서인 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR)을 시작으로 최근 활발히 이용되고 있는 Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth (AMSR-E), AMSR2 등 다양하게 발전되어 왔다(Owe et al., 2001; Nioku et al., 2003; Cho et al., 2015). 또한, 능동형 마이크로파 센서인 European Remote Sensing (ERS-1), Advanced Scatterometer (ASCAT)등도 많이 이용되고 있으며, 2015년에는 능동형과 수동형을 같이 탑재한 Soil Moisture Active Passive (SMAP)이 발사된 바 있다(Altese et al., 1996; Bartalis et al., 2007; Entekhabi et al., 2010). 위성자료 기반의 토양수분 자료는 주기적으로 자료를 생산할 수 있고, 관측소의 설치가 불가능한 지역도 촬영 및 관측할 수 있다는 장점이 있어 전세계적의 다양한 조건에서 검증 및 활용되고 있다. 하지만, 산출물의 시간/공간 해상도의 문제, 주파수 간섭의 문제(Radio-frequency interference, RFI)등의 한계점도 분명히 존재하므로 산출된 데이터를 한반도의 물 관리를 위해 바로 적용하기에는 적절하지 않을 수 있다(Kerr et al., 2012; Cho et al., 2015). 따라서 위성기반의 토양수분 자료를 활용하기 위해서는 한반도의 지리적, 지형적, 환경적인 요소를 고려한 기초 연구가 반드시 선행되어야 한다(Cho et al., 2016).

최근에는 지구 밖의 천체에서 발생된 고 에너지의 입자인 Cosmic-Ray 중성자를 감지하여 토양

수분 자료를 산출하는 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Cosmic-ray 중성자 측정법을 통한 토양수분 측정은 지상관측 자료임에도 불구하고, 300m의 반경을 가지므로 비교적 넓은 범위에 대한 대표성을 가질 수 있다는 장점이 있다 (Zreda et al., 2008; Robinson et al., 2008). Cosmic-ray 입자는 지표에 고속의 중성자 형태를 띄게 되는데, 이 고속 중성자는 토양수분에 의해 의해 감소된다. 따라서 고속 중성자의 밀도가 토양수분과 음의 상관관계를 나타내게 되고 이를 통해 토양수분 함유량을 산출한다(Kodama et al., 1985; Zreda et al., 2011; Bogena et al., 2013). 이 방식은 상당히 높은 정확도를 가지며, 반경 300m의 비교적 넓은 공간 대표성을 지니기 때문에, 위성 기반의 토양수분자료를 검증하기 위한 기준 자료로 활용되기에 적합하다. 한반도에서의 적용 사례로는 수원시 성균관대학교 실험 유역에 설치된 Cosmic-ray를 활용하여 성공적으로 토양수분자료를 산출한 사례가 있다(Nguyen et al., 2017). Cosmic-ray 토양수분 관측치의 특성상, TDR, FDR과 달리 유효 깊이가 변동성을 가

지게 되는데, 이는 다양한 자료와의 혼합 사용에 있어서 많은 어려움을 유발할 수 있다. 현재, 이러한 한계를 극복하기 위해 Cosmic-ray 기반의 토양수분 자료와 TDR, FDR로 측정된 토양수분 자료를 합성하여 뿌리 층 토양수분을 산정하는 산정하는 연구가 진행 중에 있다(그림 1).

앞서 언급된 토양수분을 관측하는 다양한 방법들은 각각 다른 물리적 기반을 이용하고 있으며, 서로 장단점이 분명하다. 따라서 토양수분 자료를 활용할 때에는 적용하고자 하는 대상과 자료의 특성을 정확히 이해하고 선택적으로 활용하는 것이 중요하며, 필요 시에는 다양한 방식의 토양수분 자료를 함께 활용하는 것이 적절하다고 판단된다.

3. 한국형 토양수분 관측망 구축

토양수분 관측망을 구축하는데 있어서 주요 고려사항으로는 크게 3가지를 꼽을 수 있다. 1) 관측자료는 일정한 시간 간격을 갖고 꾸준히 제공될 수 있어야 한다. 2) 관측된 자료는 엄격한 품질 관리 과정을 거쳐 자료의 신뢰도가 보장되어야 하

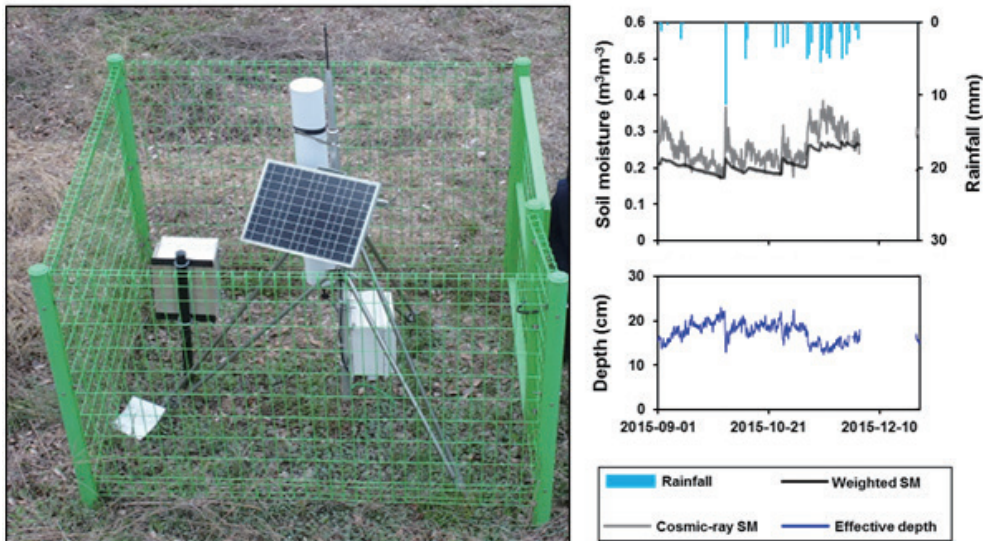


Fig. 2 Flowchart of experimental verification of the reduction device

고, 3) 사용자가 각 목적에 맞게 활용할 수 있도록 다양한 형태로 제공되어야 한다. 즉, 어느 한가지의 관측방법 만으로 생산된 자료는 완전할 수 없으며, 다양한 관측방법의 장단점을 충분히 활용하여 혼합 사용함으로써 완성도 높은 토양수분 자료 제공이 가능하다. 또한 각 관측소는 매뉴얼화를 통한 운영 및 관리 방안을 일원화 하는 것이 요구된다. 이를 위해서는 각 관측소를 설치할 때 해당 지역의 다양한 지리, 지형, 수문환경적 특성을 고려한 분석이 선행되어야 하고, 이를 반영한 산출방법을 통해 처리되고 있음이 검증되어야 한다. 특히 한반도와 같이 지형이 복잡하고 산지에 의한 변수가 많은 곳에서는 지점 별 분석만이 아니라면 단위의 분석과 유역 별 분석이 반드시 함께 이루어져야 하므로 TDR, FDR, Cosmic-ray, 인공위성의 다양한 방식을 수용하고 복합적인 검증을 거친 자료가 생산되어야 한다

성균관대학교와 한국수자원조사기술원은 시험유역을 설정하여 다양한 토양수분 자료를 한국 지형에 맞게 최적화 하고 관측소의 설치 및 운영에 필요한 요소에 대해서 가이드라인을 제시하고자 하는 연구를 진행하고 있다. 해당 연구를 통해 추후 새로운 토양수분 관측소를 설치할 때 고려해야 할 요소와 자료를 최적화하는 방법, 산출된 자료에 대한 품질관리 방식을 체계화함으로써, 양질

의 토양수분 자료를 생산하는 관측소를 효과적으로 설치할 수 있도록 하는 것이 주 목적이다. 현재 시험 유역 선정 단계에 있으며 후보지를 다각적으로 평가하고자 한다. 시험 유역의 관측소는 추후 전국적인 관측소 설치의 기준이 될 수 있어야 하므로, 대표성을 갖는 지역이 선정되어야 한다고 판단하였다. 한반도 지형은 주로 산지로 이루어져 있으므로 타 지점에서의 적용성을 고려하여 산지를 선택하되, 장기간의 수문조사가 이루어져 강수, 증발산, 유출 등의 기존 관측자료를 활용할 수 있는 지역을 선정하여 최적화를 위한 물 수지 분석이 가능한 지점을 선정하고자 한다. 각 지점 및 유역은 지형 및 수문학적 특성을 확인하기 위해 드론을 활용하여 유역 특성 분석을 실시하고 있다 (그림 2).

선정된 시험유역에서는 다양한 장비로부터 산출된 자료를 통해 토양수분 측정방식을 최적화하는 연구가 차년도에서 수행될 예정이다. 특히 점 단위, 유역 단위, 면 단위의 다각적인 분석을 통해 양질의 토양수분 자료를 생산할 수 있도록, 각 센서 및 관측장비를 설치할 위한 기준을 제시할 것이다. 이를 위해, 소유역의 대표성, 자료들의 활용도, 실질적인 운영 및 관리의 편리성 등을 고려할 것이다. 또한 그림 3에 나타난 각 유역들의 사례에서와 같이, 지점 관측 센서의 배치 역시 유역의 전

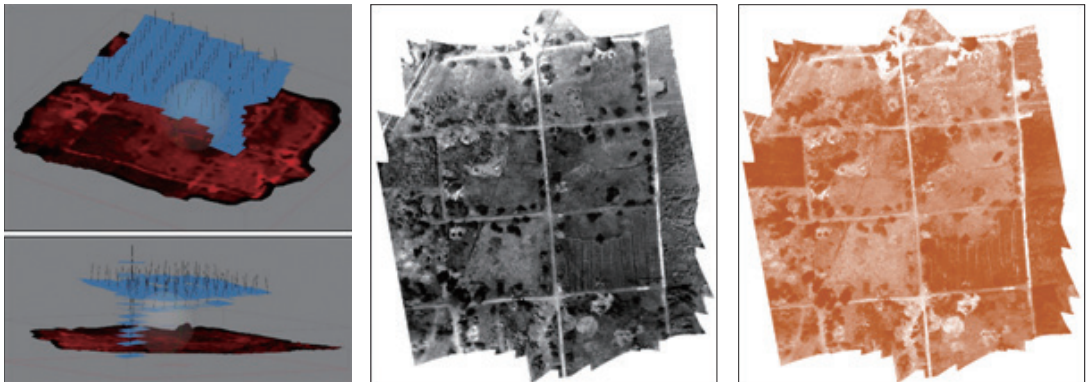


Figure 2. 지리, 지형적 특성 및 수문학적 환경 분석을 위한 드론 촬영 이미지

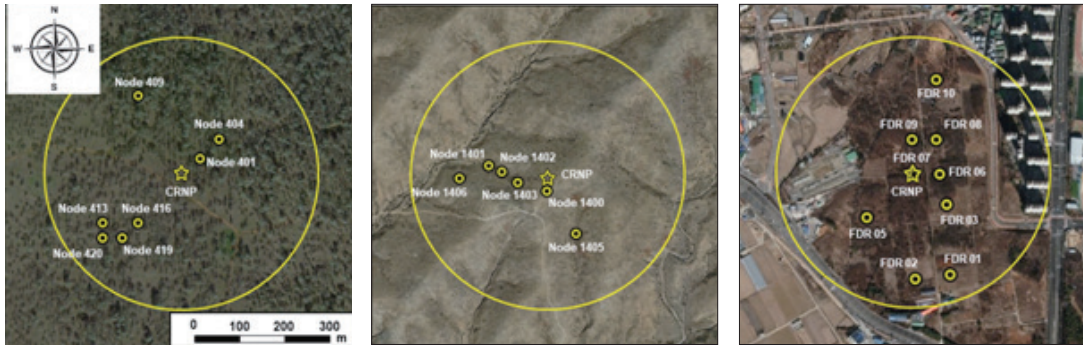


Figure 3. Cosmic-ray와 지점 관측 자료를 활용하기 위한 센서 배치 사례(왼쪽부터 Tonzi Ranch, U.S.A., Kendall, U.S.A., SM-FC, Korea)

체적인 특성을 잘 반영하여야 하므로 중요한 고려 대상이 된다. 인공위성과 Cosmic-ray 자료를 기반으로 산출되는 토양 수분 자료의 공간 해상도와 지점 기반으로 표출되는 TDR, FDR 센서의 특성을 고려하여 공간적으로 서로 보완될 수 있도록 설치되어야 하며, 최종적으로는 사용자의 다양한 요구에 맞는 자료를 생산하는 것을 목표로 한다.

산출된 자료는 검증과 보정 등의 과정을 거쳐 지속적인 품질관리가 이루어질 수 있도록 하는 것이 중요하다. 각 센서 및 장비를 통해 산출된 복합 토양수분량 자료는 기존의 강수량, 증발산량, 강우유출량과 함께 물 수지 분석에 사용되어 최적화 되는 과정을 거치게 된다. 이러한 과정을 통해 최적화된 수문 자료들은 유역의 물 순환 시스템을 규명할 수 있을 뿐만 아니라, 국가 물 관리에 요구되는 기초수문자료를 생산함으로써 기후 시스템의 이해, 자연재해의 예측 등을 위한 모델의 정확도를 크게 향상시킬 수 있을 것이다.

4. 맺음말

수문기상 자료는 국가 물 관리 정책 및 수자원 계획을 수립을 위한 필수적인 요소이다. 토양수분량은 국가수문조사사업, 수자원장기종합계획, 하천기본계획과 같은 수자원 계획의 수립에 있어

서 기본이 되는 자료로 활용되며, 홍수 및 갈수 예보, 가뭄 분석, 산사태 등 방재에도 활용되는 중요한 수문인자이다. 그럼에도 불구하고 국내에는 토양수분을 실측하고 품질관리를 통해 제공하는 관측소가 거의 전무한 실정이라, 경험식이나 가정에 의한 단순 추정치 등을 활용할 수 밖에 없다. 점점 심화되는 기후변화와 수자원 재해의 빈도에 따라 보다 정확한 기초수문자료의 수요는 더욱 높아질 것으로 전망된다. 해외의 사례와 같이 토양수분량 관측망을 구축하여 활용하기 위해서는 현재 활용되는 점 단위의 계측시스템과 연계할 수 있는 면 단위의 관측시스템의 설계가 필요하다. 따라서, 공간적으로 대표성이 있는 양질의 토양수분 자료를 일관성 있게 생산할 수 있는 관측소를 설치하는 연구를 통해, 추후 한국형 토양수분량 관측망을 구축하기 위한 기준이 제시되어야 한다. 각 기준을 만족하는 관측소들이 설치되어 구축된 한국형 토양수분량 관측망은 국가 물 관리 정책의 정확도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대되며, 기존의 자료와 함께 수문 순환 시스템을 이해하는데 기여할 수 있다. 나아가, 향상된 수문자료를 기반으로 가뭄 및 홍수와 같은 자연재해를 분석함으로써 보다 적극적인 대비, 대응책을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

“본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C143685-01)에 의해 수행되었습니다.”



Altese, E., Bolognani, O., Mancini, M., Troch, P. (1996). Retrieving Soil Moisture Over Bare Soil from ERS 1 Synthetic Aperture Radar Data: Sensitivity Analysis Based on a Theoretical Surface Scattering Model and Field Data, *Water Resources Research*, 32(3), 653–661, <https://doi.org/10.1029/95WR03638>

Bartalis, Z., Wagner, W., Naeimi, V., Hasenauer, S., Scipal, K. (2007). Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT), *Geophysical Research Letters*, 34(20), L20401, <https://doi.org/10.1029/2007GL031088>

Bogena, H. R., Huisman, J. A., Baatz, R., Franssen, H. J. H., Vereecken, H. (2013). Accuracy of the cosmic-ray soil water content probe in humid forest ecosystems: The worst case scenario. *Water Resour. Res.*, 49, 5778–5791, <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20463>

Cho, E., Choi, M., Wagner, W. (2015). An assessment of remotely sensed surface and root zone soil moisture through active and passive sensors in northeast Asia, *Remote Sensing of Environment*, 160, 166–179, doi:10.1016/J.RSE.2015.01.013

Cho, E., Moon, H., Choi, M. (2015). First Assessment of the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) Soil Moisture Contents in Northeast Asia, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Ser. II, 93(1), 117–129, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-008>

Cho, E., Zhang, A., Choi, M. (2016). The Seasonal Difference in Soil Moisture Patterns Considering the Meteorological Variables Throughout the Korean Peninsula, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 27(6), 907–920, doi: 10.3319/TAO.2016.07.12.01

Dorigo, W., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C. (2011). The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1675–1698, <https://doi.org/10.5194/hess-15-1675-2011>

Entekhabi, D., et al. (2010). The Soil Moisture Active Passive(SMAP) Mission,

Proceedings of the IEEE, 98(5), 704–716, doi:10.1109/JPROC.2010.2043918

Jung, M., et al. (2010), Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply, *Nature*, 467(7318), 951–954, doi:10.1038/nature09396

Kerr, Y., Waldteufel, P., Richaume, P., Wigneron, J., Ferrazzoli, P., Mahmoodi, A. (2012), The SMOS soil moisture retrieval algorithm, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5), 1384–1403, doi:10.1109/TGRS.2012.2184548

Kim, H., Choi, M. (2015), Impact of soil moisture on dust outbreaks in East Asia: Using satellite and assimilation data, *Geophysical Research Letters*, 42(8), 2789–2796, <https://doi.org/10.1002/2015GL063325>

Kodama, M., Kudo, S., Kosuge, T. (1985), Application of atmospheric neutrons to soil moisture measurement. *Soil Sci.*, 140, 237–242

Komma, J., Blöschl, G., Reszler, C. (2008), Soil moisture updating by Ensemble Kalman Filtering in real-time flood forecasting, *Journal of Hydrology*, 357(3–4), 228–242, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.020>

Koster, R. D., et al. (2004), Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation, *Science*, 3055(5687), 1138–1140, doi:10.1126/science.1100217

Leroux, D., Kerr, Y., Richaume, P., Fieuzal, R. (2013), Spatial distribution and possible sources of SMOS errors at the global scale, *Remote Sensing of Environment*, 133, 240–250, doi:10.1016/J.RSE.2013.02.017

Nguyen, H. H., Kim, H., Choi, M. (2017), Evaluation of the soil water content using cosmic-ray neutron probe in a heterogeneous monsoon climate-dominated region, *Advances in Water Res.*, 108, 125–138, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.07.020>

Njoku, E., Jackson, T., Lakshmi, V., Chan, T., Nghiem, S. (2003), Soil moisture retrieval from AMSR-E, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2), 215–229, doi:10.1109/TGRS.2002.808243

Owe, M., R. Jeu D., Walker, J. (2001), A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8), 1643–1654, doi:10.1109/36.942542

Reynolds, S. (1970), The gravimetric method of soil moisture determination Part I A study of equipment, and methodological problems, *Journal of Hydrology*, 11(3), 258–273, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90066-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90066-1)

Robinson, D. A., Campbell, C. S., Hopmans, J. W., Hornbuckle, B. K., Jones, S. B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J., Wendroth, O. (2008), Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review. *Vadose Zone J.*, 7, 358–389, doi:10.2136/vzj2007.0143

Schaufler, G., Kitzler, B., Schindlbacher, A., Skiba, U., Sutton, M. (2010). Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature, *European Journal of Soil Science*, 61(5), 683–696, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01277.x>

Sheffield, J., Goteti, G., Wen, F., Wood, E. (2004). A simulated soil moisture based drought analysis for the United States, *Journal of Geophysical Research*, 109(D24) D24108, doi:10.1029/2004JD005182

Zreda, M., Desilets, D., Ferre, T. P. A., Scott, R. L. (2008). Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons, *Geo-phys. Res. Lett.*, 35(L21402), <https://doi.org/10.1029/2008GL035655>

Zreda, M., Zeng, X., Shuttleworth, J., Zweck, C., Ferre, T., Franz, T., Rosolem, R., Desilets, D., Desilet, S., Womack, G. (2011). Cosmic-ray neutrons, an innovative method for measuring area-average soil moisture, *GEWEX 21* (3), 6–11
