

## Views &amp; Comments

## 环境信息系统——为水管理数字化 (Water 4.0) 铺平道路

Olaf Kolditz<sup>a,b,e</sup>, Karsten Rink<sup>a</sup>, Erik Nixdorf<sup>a</sup>, Thomas Fischer<sup>a</sup>, Lars Bilke<sup>a</sup>, Dmitri Naumov<sup>a</sup>, Zhenliang Liao<sup>c,e</sup>, Tianxiang Yue<sup>d,e</sup>

<sup>a</sup> Department of Environmental Informatics, Helmholtz Center for Environmental Research (UFZ), Leipzig 04318, Germany

<sup>b</sup> Applied Environmental Systems Analysis, Technische Universität Dresden, Dresden 01069, Germany

<sup>c</sup> UN Environment–Tongji Institute of Environment for Sustainable Development & College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

<sup>d</sup> Department for Ecological and Environmental Informatics, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 1000101, China

<sup>e</sup> Sino-German Research Center for Environmental Information Science (RCEIS), Leipzig 04318, Germany

## 1. 引言

提供可靠的信息来描述我们的自然和人为环境，特别是它的变化，对于理解环境系统中结构和过程的复杂性是至关重要的。现代遥感和监测方法提供了越来越多的环境数据，可用于各种管理目的[1,2]。过去，地理信息系统 (geographical information system, GIS) 广泛用于在地理范围内为各种目的收集和展示数据，特别是为了合并来自环境和健康等不同领域的信息 (见参考文献[3,4]中的两个例子)。另外，基于网络的工具已链接到地理信息系统以在线获取数据[5]。试图构建用于各种不同目的的信息系统并不是什么新鲜事；例如，在20世纪90年代，所谓的专家系统就是为管理环境数据而设计的[6]。这些专家系统主要由综合的数据库驱动，但由于缺少协作工作的概念和工具以及当时的技术限制而受到阻碍。

对环境信息系统 (environmental information system, EIS) 的一般性研究大约始于10年前，其基础是政治承诺，如欧盟委员会提出的共享环境信息系统的要求，该要求的目的是促进定期环境评估和环境状况报告[7]。Gu等[8]提出了一个支持基于湖泊流域水流模型 (water flow model for lake catchment, WATLAC) 湖泊模拟结果

的决策过程的虚拟环境。Melville [9]介绍了关于环境可持续性情景信息系统的研究议程。近期越来越多的实践工作与EIS的发展有关，如精准农业[10]，沿海系统附近的陆地和海洋环境的联系[11]、经济[12]以及对信息不确定性影响的调查[13]。

最近，出现了一些关于扩展EIS概念以提出社会经济方面和数据政策的著作[14]。Jung E和Jung EJ [15]引入EIS来决策和评估韩国自然灾害的影响。他们通过面向服务的体系结构 (service-oriented architecture, SOA) 集成了EIS，以便在全国和部分地区等不同规模上使用EIS方法。此外，2018年发表了许多有关EIS基本原理的综合性著作[16–18]，为科学界对这一主题日益增强的整体认识提供了基础。

上述大多数方法通过增加数据管理或信息可视化的方法来扩展标准GIS功能。然而，这种方法忽略了一个事实，即复杂的水文系统由瞬态三维 (three-dimensional, 3D) 过程组成。

相比之下，使用虚拟地理环境 (virtual geographic environment, VGE) 进行数据勘探、分析和决策会将数据的复杂性考虑在内。Su等[19]开发了一个实时、动态、交互式的大规模海洋环境数据三维可视化框架，使用虚拟现实 (virtual reality, VR) 方法在更现实的地理

环境中渲染环境过程是关于水文或大气输入数据的性质以及参数空间的多变量性质的一个逻辑结论[20,21]，并且为了设计水管理概念，有必要探索、理解观测和模拟数据。在这种情况下，科学可视化在集成和组合来自不同数据源的异构信息时起着重要的作用，特别是在数据验证方面[22–24]。VGE可应用于水文和水资源管理的操作方面，如水资源短缺识别[25]、早期洪水预警[26]和水污染控制[27]。

目前正在进行的大数据辩论集中于信息科学在众多领域的应用，包括环境科学和技术。因此，大数据与相关的工业4.0范式正在加快有意义的信息系统的构建进程，并正在调用诸如机器学习和人工智能等概念，以进一步提高数据的价值。

EIS的概念远远超出了GIS在地理环境中显示现有数据的既定用法。EIS概念还包括使用连续的数据流进行模型验证来预测环境变化的功能。除了有关EIS的概念性工作外，为特定用途的可用环境数据的最佳可用性而开发定制的工作流程的技术也是非常重要的。

## 2. 方法

“Water 4.0”的开发框架概念[28,29]是在一个信息和环境科学会议上提出的新主题[30,31]。

目前的工作有助于进一步发展网络物理系统（cyber-physical system, CPS）的概念，并且展示了它们在中德合作项目中巢湖和鄱阳湖两个具有挑战性水管理案例的应用[32,33]。

水资源管理中的数字化概念如图1所示。实际的水系统由所谓的“数字孪生”即虚拟水系统（virtual water system, VWS）表示，它必须包含实际系统的所有重要特征，这些特征的重要性取决于具体的应用目的。作为第一个案例研究（见第3.1节）的示例，VWS包括现有的供水和废水处理的基础设施。为了持续获得信息，虚拟系统必须配有实时监控和遥感信息的接口。VWS需要两个主要功能：连续数据集成（包括在线数据）和水文过程建模（数量和质量）的算法，以预测水系统的走向。这包括分别针对下水道网络、洪水和地下水的快速和缓慢过程的短期和长期预测算法。具体来说，VWS是水面和地下水水生区划之间的反馈系统，以便成为有意义的数字孪生体，用于运营和长期水管理。水基础设

施的自动化控制是“Water 4.0”概念面临的实际挑战之一。捕获真实水系统所有重要特征的VWS是实现此目标的重要前提。

在可视化地理环境中整合大量异构环境数据[22]以及解决数据和模型的不确定性问题时，科学可视化在VWS概念中起着关键作用[34]。

## 3. 示范实例

为了说明上文介绍的方法，我们提供了两个有关水资源管理的示范实例。①巢湖案例：关于快速发展的城市的供水问题；②鄱阳湖案例：涉及维护水生生态系统的问题。

### 3.1. 巢湖 EIS

巢湖EIS（Chaohu EIS）专用于供水，因为该市完全依赖巢湖作为其主要水资源。这种EIS的挑战在于湖泊、城市供水系统和地下水这三个水生区划的数据和过程的结合。图2 [32]描绘了从可用监视设备收集数据的相应工作流程。数据集成包括硬件（SensoMaster）<sup>†</sup> [35]和软件组件（用于数据可视化的AL.VIS<sup>‡</sup> [36] Web界面）。整个工作流程都被嵌入一个3D VR环境中<sup>††</sup> [37]（OpenGeoSys DataExplorer，图3）[32]。

可视化是实现EIS的重要工具。数据的结构和复杂性需要真实的地理环境以及进行交互式数据探索的可能

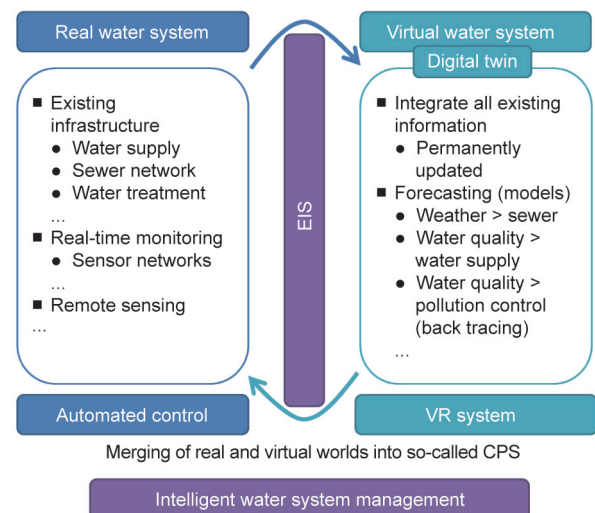


图1. 为供水而建立EIS的概念。“>”表示影响。

<sup>†</sup> From AMC—Analytik & Messtechnik GmbH Chemnitz.

<sup>‡</sup> From WISUTEC Umwelttechnik GmbH.

<sup>††</sup> From Helmholtz Center for Environmental Research (UFZ).

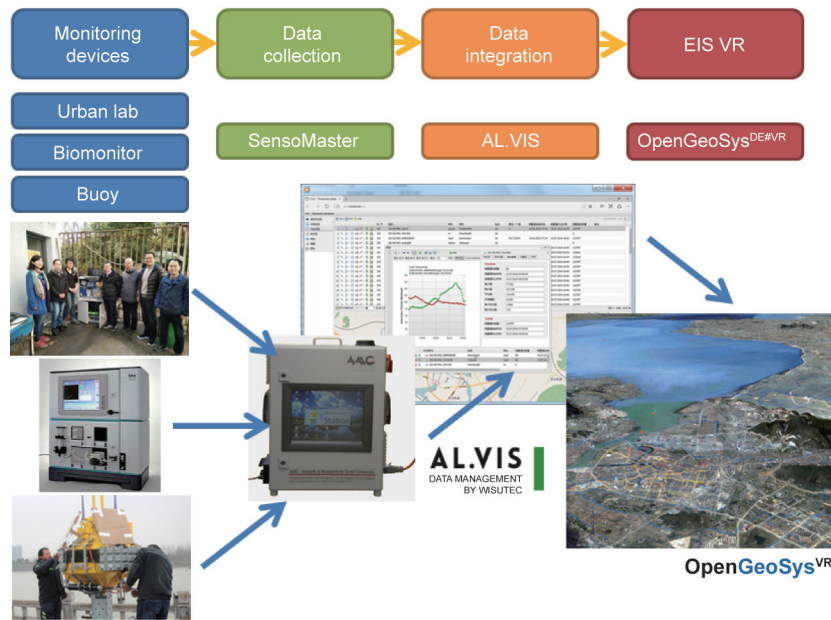


图2. 巢湖EIS数据工作流程。经Springer Nature Switzerland AG, ©2019许可, 复制自参考文献[32]。

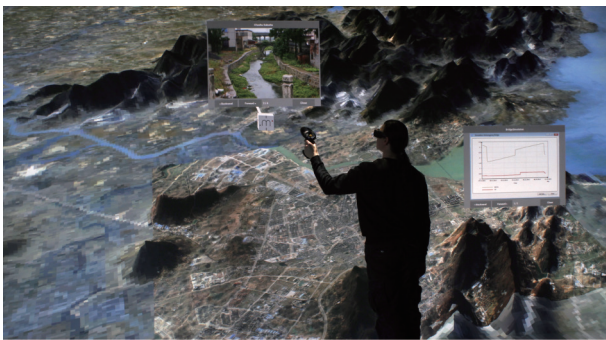


图3. 巢湖EIS: 显示巢湖市及其基础设施; 对于给定的数据点, 可以交互显示在线照片和模拟结果。经Springer Nature Switzerland AG, ©2019许可, 复制自参考文献[32]。

[38,39]。最终产品使用Unity [40]构建, 以实现个人计算机和VR环境(如头戴式显示器或视频墙)的全功能、交互式和平台独立。有关巢湖EIS的详细信息请参见文献[32]。

### 3.2. 鄱阳湖 EIS

EIS概念非常灵活, 可以解决不同规模水管理多个方面的问题。为了展示鄱阳湖流域的水文过程, 如由于流域内复杂的径流产生过程以及与长江水位动态(图4)[41]的相互作用导致的湖区季节性变化, 开发了鄱阳湖EIS的原型(Poyang EIS)。

鄱阳湖是一个高度活跃的湖泊-河流-湿地系统, 规模独特, 生物多样性极高, 并为包括稀有候鸟[42,43]在内的多种生物境提供了栖息地。作为长江下游流域的一部分, 该湖的水生生态系统对河流本身的水位变化非

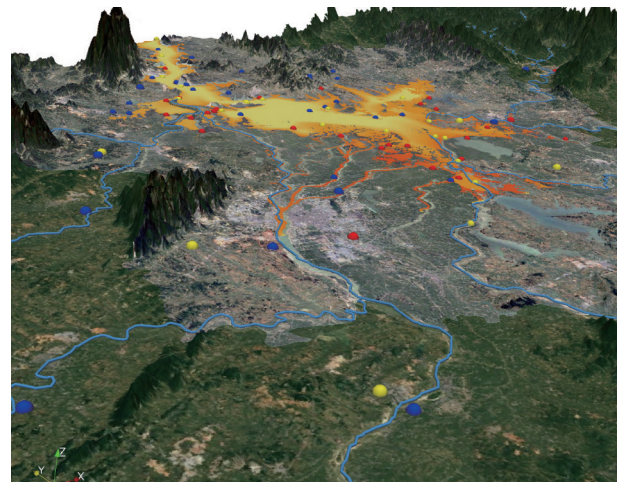


图4. 鄱阳湖EIS: 显示水质方面(有色水体)以及观测和测量地点(彩色球体)[41]。

常敏感。对于诸如三峡大坝或南水北调工程之类的长江沿岸大型水建设工程而言, 分析湖泊的恢复力变得非常重要。高精度EIS可以用于计划目的和环境影响评估。鄱湖水EIS综合了河网测站的水质和水量的水文数据, 对地表水和湿地中地下水的水位和流量特性进行了数值模拟, 并将遥感提取的水文信息纳入整个鄱湖流域(162 225 km<sup>2</sup>)的一个系统。有关鄱阳湖EIS的更多信息请参见文献[41,44]。

## 4. 结论性意见和观点

Water 4.0主要研究供水系统的自动运行管理, 以控

制和优化现有基础设施。这个概念的实现还处于起步阶段。实际案例研究对于证明和进一步推进一般概念具有重要意义。Water 4.0概念的成功不仅取决于计算机科学的进步，而且主要取决于从业人员、利益相关者和决策者的参与。

EIS的概念依赖于Water 4.0，但通过已建立的建模工具，在水文环境的可预测性方面又向前迈了一步。

图5从分析平台OpenGeoSys [45]的角度描绘了一个概念图，该平台已针对各种环境应用实施了 workflows，包括城市能源基础设施，即地热系统[46–48]、水文应用[49,50]和废物管理[51]。未来的应用将受益于信息科学和技术对现代概念的探索，如可视化数据分析、机器学习方法和人工智能。

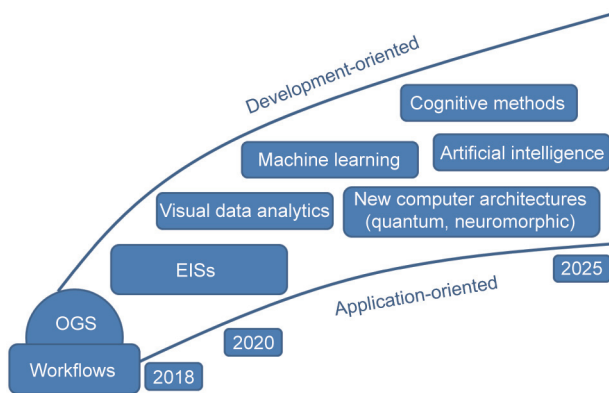


图5. EIS概念图。OGS: OpenGeoSys。

需要考虑计算机硬件的新发展，以便利用可用的计算能力进行更精细和精确的过程模拟（如超大规模计算）。因此，开发路径需要同时遵循面向开发和面向应用的原则。

通过EIS和Water 4.0概念，特别是通过应用研究，将环境科学与信息技术相结合，将进一步为数字化水管理铺平道路，同时也是中德环境研究合作非常有前景的新研究领域[52]。

## Acknowledgements

The material of the paper is based on a keynote speech at the International Summit Forum of the Chinese Academy of Engineering (CAE) on Water Pollution Control from 2018 October 24–25 in Hangzhou, China. We are very grateful to the Chinese Research Academy of Environmental Sciences

(CRAES) for their kind support concerning the conference attendance. The authors also greatly acknowledge the financial support from various grants: the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) for funding the Chaohu Lake project in the frame of the Chinese Major Water Program (02WCL1337A-E), the Sino-German Center for Science Promotion (CDZ) for the Poyang Lake project (GZ1167), the Helmholtz Association for supporting the establishment of Center for Environmental Information Science (HIRN 0002), and the Chinese Academy of Sciences (CAS) for providing support to various activities through the CAS President's International Fellowship Initiative (PIFI).

## References

- [1] Kunkel R, Sorg J, Eckardt R, Kolditz O, Rink K, Vereecken H. TEODOR: a distributed geodata infrastructure for terrestrial observation data. *Environ Earth Sci* 2013;69(2):507–21.
- [2] Wollschläger U, Attinger S, Borchardt D, Brauns M, Cuntz M, Dietrich P, et al. The Bode hydrological observatory: a platform for integrated, interdisciplinary hydro-ecological research within the TERENO Harz/Central German Lowland Observatory. *Environ Earth Sci* 2017;76(1):29.
- [3] Vine MF, Degnan D, Hanchette C. Geographic information systems: their use in environmental epidemiologic research. *Environ Health Perspect* 1997;105(6):598–605.
- [4] Nuckols JR, Ward MH, Jarup L. Using geographic information systems for exposure assessment in environmental epidemiology studies. *Environ Health Perspect* 2004;112(9):1007–15.
- [5] Kingston R, Carver S, Evans A, Turton I. Web-based public participation geographical information systems: an aid to local environmental decisionmaking. *Comput Environ Urban Syst* 2000;24(2):109–25.
- [6] Kerschberg L. Expert database systems: knowledge/data management environments for intelligent information-systems. *Inf Syst* 1990;15(1):151–60.
- [7] European Commission. Communication from the commission to the council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions—towards a shared environmental information system (SEIS). Technical report. Brussels: European Commission; 2008.
- [8] Gu S, Fang C, Wang Y. Virtual geographic environment for WATLAC hydrological model integration. In: Proceedings of the 25th International Conference on Geoinformatics; 2017 Aug 2–4; New York, NY, USA; 2017.
- [9] Melville NP. Information systems innovation for environmental sustainability. *MIS Quart Manage Inf Syst* 2010;34(1):1–21.
- [10] Zhang B, Carter J. FORAGE—an online system for generating and delivering property-scale decision support information for grazing land and environmental management. *Comput Electron Agric* 2018;150:302–11.
- [11] Fatehian S, Jelokhani-Niaraki M, Kakroodi AA, Dero QY, Samany NN. A volunteered geographic information system for managing environmental pollution of coastal zones: a case study in Nowshahr, Iran. *Ocean Coast Manage* 2018;163:54–65.
- [12] Meiryani M, Susanto A, Warganegara DL. The issues influencing of environmental accounting information systems: an empirical investigation of SMEs in Indonesia. *Inter J Energy Econom Policy* 2019;9(1):282–90.
- [13] Fitrius R, Susanto A, Soemantri R, Suharman H. The influence of environmental uncertainty on the accounting information system quality and its impact on the accounting information quality. *J Theo Appl Inform Technol* 2018;96(21):7164–75.
- [14] Aggestam F. Setting the stage for a shared environmental information system. *Environ Sci Policy* 2019;92:124–32.
- [15] Jung E, Jung EJ. Service-oriented architecture of environmental information systems to forecast the impacts of natural disasters in Korea. *J Enterp Inf Manag* 2019;32(1):16–35.
- [16] Khosrow-Pour M. Environmental information systems: concepts, methodologies, tools, and applications. Hershey: IGI Publishing; 2018.
- [17] Sun Y, Xu Y. Thinking on the trend of environmental information system. *IOP Conf Series Mater Sci Eng* 2018;439(3):032064.
- [18] Aronczyk M. Environment 1.0: infoterra and the making of environmental information. *N Media Soc* 2018;20(5):1832–49.
- [19] Su T, Cao Z, Lv Z, Liu C, Li X. Multi-dimensional visualization of large-scale

- marine hydrological environmental data. *Adv Eng Softw* 2016;95:7–15.
- [20] Lin H, Batty M, Jørgensen SE, Fu B, Konecny M, Voinov A, et al. Virtual environments begin to embrace process-based geographic analysis. *Trans GIS* 2015;19(4):493–8.
- [21] Chen M, Lin H, Kolditz O, Chen C. Developing dynamic virtual geographic environments (VGEs) for geographic research. *Environ Earth Sci* 2015;74(10):6975–80.
- [22] Rink K, Fischer T, Selle B, Kolditz O. A data exploration framework for validation and setup of hydrological models. *Environ Earth Sci* 2013;69(2):469–77.
- [23] Bilke L, Fischer T, Helbig C, Krawczyk C, Nagel T, Naumov D, et al. TESSIN VISLab—laboratory for scientific visualization. *Environ Earth Sci* 2014;72(10):3881–99.
- [24] Helbig C, Bilke L, Bauer HS, Böttinger M, Kolditz O. MEVA—an interactive visualization application for validation of multifaceted meteorological data with multiple 3D devices. *PLoS ONE* 2015;10(4):e0123811.
- [25] Lei T, Liang X, Mascaro G, Luo W, White D, Westerhoff P, et al. An interactive web-based geovisual analytics tool to explore water scarcity in Niger River Basin. In: Middel A, Rink K, Weber GH, editors. *Workshop on visualisation in environmental sciences*. Geneva: The Eurographics Association; 2015.
- [26] Marbouti M, Bhaskar R, Zahra SHA, Anslow C, Jackson L, Maurer F. *WaterVis: geovisual analytics for exploring hydrological data*. Berlin: Springer; 2018.
- [27] Rink K, Chen C, Bilke L, Liao Z, Rinke K, Frassl M, et al. Virtual geographic environments for water pollution control. *Int J Digit Earth* 2018;11(4):397–407.
- [28] Water Sedlak D. *Water 4.0: the past, present, and future of the world's most vital resource*. New Haven: Yale University Press; 2014.
- [29] Schaffer C, Vestner R, Bufler R, Werner U, Ziemer C. *Wasser 4.0. Report*. Berlin: German Water Partnership; 2017. German.
- [30] Abdelhafidh M, Fourati M, Fourati LC, Abidi A. Remote water pipeline monitoring system IoT-based architecture for new industrial era 4.0. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Computer Systems and Applications*; 2017 Oct 30–Nov 3; Hammamet, Tunisia; 2017.
- [31] Baikousis B, Meyer H. IFAT 2018 shows the way to water management 4.0. *Wasserwirtschaft* 2018;108(5):50–1.
- [32] Sachse A, Liao Z, Hu W, Dai X, Kolditz O, editors. *Managing water resources for urban catchments: Chaohu*. Heidelberg: Springer; 2019.
- [33] Yue T, Nixdorf E, Zhou C, Xu B, Zhao N, Fan Z, editors. *Poyang Lake Basin*. Heidelberg: Springer; 2019.
- [34] Zehner B, Watanabe N, Kolditz O. Visualization of gridded scalar data with uncertainty in geosciences. *Comput Geosci* 2010;36(10):1268–75.
- [35] AMC—Analytik & Messtechnik GmbH Chemnitz [Internet]. Chemnitz: AMC; [cited 2019 May 15]. Available from: <https://www.amc-systeme.de>.
- [36] WISUTEC Umwelttechnik GmbH [Internet]. Chemnitz: WISUTEC Umwelttechnik GmbH; [cited 2019 May 15]. Available from: <https://www.wisutec.de/>.
- [37] Visualization Center [Internet]. Leipzig: Helmholtz Center for Environmental Research (UFZ); [cited 2019 May 15]. Available from: [www.ufz.de/vislab](http://www.ufz.de/vislab).
- [38] Rink K, Bilke L, Kolditz O. Visualisation strategies for environmental modelling data. *Environ Earth Sci* 2014;72(10):3857–68.
- [39] Helbig C, Bauer HS, Rink K, Wulfmeyer V, Frank M, Kolditz O. Concept and workflow for 3D visualization of atmospheric data in a virtual reality environment for analytical approaches. *Environ Earth Sci* 2014;72(10):3767–80.
- [40] Unity Technologies [Internet]. Unity Technologies; [cited 2019 May 15]. Available from: <https://unity3d.com>.
- [41] Rink K, Nixdorf E, Zhou C, Hillmann M, Bilke L. A virtual geographic environment for multi-compartment water and solute dynamics in large catchments. Technical report. Leipzig: Helmholtz Center for Environmental Research (UFZ); 2019.
- [42] Du Y, Peng W, Wang S, Liu X, Chen C, Liu C, et al. Modeling of water quality evolution and response with the hydrological regime changes in Poyang Lake. *Environ Earth Sci* 2018;77(7):265.
- [43] Wang J, Chen E, Li G, Zhang L, Cao X, Zhang Y, et al. Spatial and temporal variations of suspended solid concentrations from 2000 to 2013 in Poyang Lake, China. *Environ Earth Sci* 2018;77(16):590.
- [44] Yan C, Rink K, Bilke L, Nixdorf E, Yue T, Kolditz O. Virtual geographical environment-based environmental information system for Poyang Lake Basin. In: *Chinese water systems: Poyang Lake Basin*. Heidelberg: Springer; 2019. p. 293–308.
- [45] OpenGeoSys [Internet]. Leipzig: Helmholtz Center for Environmental Research (UFZ); [cited 2019 May 15]. Available from: [www.opengeosys.org](http://www.opengeosys.org).
- [46] Major M, Poulsen SE, Balling N. A numerical investigation of combined heat storage and extraction in deep geothermal reservoirs. *Geothermal Energy* 2018;6:1.
- [47] Chavot P, Heimlich C, Masseran A, Serrano Y, Zougrana J, Bodin C. Social shaping of deep geothermal projects in Alsace: politics, stakeholder attitudes and local democracy. *Geothermal Energy* 2018;6:26.
- [48] Michalski A, Klitzsch N. Temperature sensor module for groundwater flow detection around borehole heat exchangers. *Geothermal Energy* 2018;6:15.
- [49] Kalbacher T, Delfs JO, Shao H, Wang W, Walther M, Samaniego L, et al. The IWAS-ToolBox: software coupling for an integrated water resources management. *Environ Earth Sci* 2012;65(5):1367–80.
- [50] Walther M, Bilke L, Delfs JO, Graf T, Grundmann J, Kolditz O, et al. Assessing the saltwater remediation potential of a three-dimensional, heterogeneous, coastal aquifer system: model verification, application and visualization for transient density-driven seawater intrusion. *Environ Earth Sci* 2014;72(10):3827–37.
- [51] Kalbacher T, Mettier R, McDermott C, Wang W, Kosakowski G, Taniguchi T, et al. Geometric modelling and object-oriented software concepts applied to a heterogeneous fractured network from the Grimsel rock laboratory. *Computat Geosci* 2007;11(1):9–26.
- [52] Chen C, Börnick H, Cai Q, Dai X, Jähnig SC, Kong Y, et al. Challenges and opportunities of German–Chinese cooperation in water science and technology. *Environ Earth Sci* 2015;73(8):4861–71.