

基于地理信息系统的生态水文模型研究进展

张翼, 计勇, 王凯, 刘星辰, 杨军飞

(南昌工程学院水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要:在明确生态水文学及生态水文模型概念的基础上,重点阐述了基于GIS生态水文模型数据集优化的研究进展,探讨了目前基于GIS实现生态水文耦合相关研究存在的显著问题,即尺度转换、耦合点和耦合方法,并根据当前问题阐述未来生态水文模型发展方向,建立大尺度和适用广泛的生态水文模型将是下一步研究的重点。

关键词:地理信息技术;生态水文模型;尺度转换;耦合点;耦合方法

中图分类号:P343 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2020)04-0265-06

0 引言

生态水文学是描述生态格局和生态过程水文学机制的科学^[1],根据研究目的和研究环节的需求,综合使用生态学和水文学方法,同时依靠统计学及确定性模型分析方法实现水文学与生态学的耦合^[2-3]。无论在水文学领域还是生态学领域都拥有庞大数目的模型,这无疑能够为生态水文模型的发展奠定牢固的基础^[4]。在地理信息技术(GIS)的支撑下,生态水文模型已成为定量研究生态系统水文过程影响机理和过程的主要手段,但是,二者在过程尺度、观测尺度和模型工作尺度上的不吻合,以及由此引发的在转化过程中的问题仍是制约生态水文模型发展的最大阻力^[2]。GIS是集采集、储存、转化、可视化于一体的空间数据工具集合^[5-6]。借助GIS为分析平台探究生态过程的水文响应和水文过程,从典型的生态水文过程出发,能够实现揭示其对生态水环境安全影响,进而建立能够模拟并预测水文、土壤、植被等主要构成要素之间相互制衡关系的生态水文模型^[7-9],并能够以数学和逻辑表达定量反映生态过程和水文过程的影响机制、状况、过程^[10]。

1 基于GIS生态水文模型研究进展

水文模型是用数学的方式描述自然界中水文循环特征的重要工具。近年来国内外涌现了诸如SWAT^[11]、MIKE-SHE^[12]、DHSVM^[13]和GISMOD^[14]等水文模型,在水资源管理及保护、洪涝灾害风险评估等问题的解决提供了显著的参考价值。但是,水文模型往往缺乏对水文过程中生态机制描述的内容,导致生态环境这一在水文循环中扮演重要角色的条件被排除在模型外,这无疑成为水文模型发展的瓶颈。生态模型在其领域也有类似的际遇^[15,16]。随着生态水文学的日趋成熟,生态水文模型也在众多迫切需求下发展出来。

最早的生态水文模型耦合一般通过数据驱动模型,基于长期监测数据建立生态过程和水文过程之间的相互关系。但是生态水文模型往往是从较大的尺度研究,所获取的数据也相对大而稀疏,所以地理信息方法是当下生态水文耦合的主要方式。在GIS为平台上,实现将传统水文模型与生态模型的因子维持在同一个尺度框架里,以此达到模型数据共享的目的,如图1所示。现阶段的生态水文模型大多都是建立在水文模

收稿日期:2020-03-25

项目来源:研究生创新基金项目(YJSCX20190001;YJSCX20190002;YJSCX20190006);江西省科技厅科技项目(20171ACB21050;20182BCB22013)、江西省教育厅科技项目(GJJ180927)。

作者简介:张翼(1995-),男,大学本科。

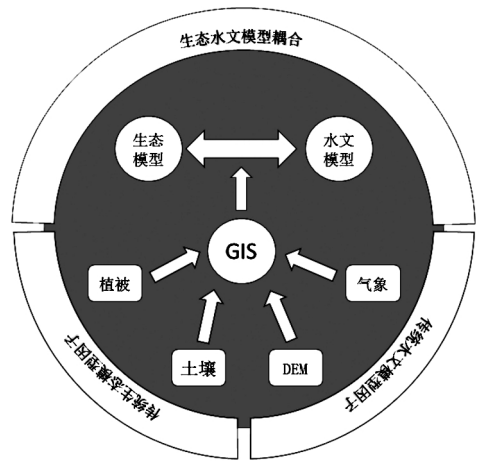


图 1 GIS 在生态水文模型中耦合

型的基础上,综合生态学方法,明确生态指标与水文生态指标的定量关系,以阐明生态指标对水文过程的影响或者生态响应。生态水文模型可按照空间离散化程度分为总集式和分布式模型^[17-20]。总的来说生态水文模型经历从集总式过渡到分布式模型的客观发展规律^[21]。

1.1 基于 GIS 生态水文模型下垫面模拟优化

下垫面条件通过调节产汇流过程对水文过程产生重要影响,土壤和植被作为改变下垫面条件的决定性条件,在水文过程的不同阶段,包括蒸散、截留、填洼和下渗等产流过程产生影响。但是,下垫面的时间异质性如何在生态水文模型中表现出来,一直是生态水文模型研究中的重要课题。下面分别介绍在建立下垫面方面国内外的研究进展,如表 1 所示。

1.2 基于 GIS 生态水文模型气象模拟优化

气候变化对水文过程的影响主要集中于气候条件的改变对径流、蒸散等水文过程产生的影响。一般来说,主要数据有日降水量、最大最小气温、太阳辐射、风速和相对湿度。这些数据可通过模型输出,也可直接输入实测数据。气象数据的空间插值是构建分布式水文模型的必然要求,可以结合气象模拟软件填补普通的 GIS 软件不具备的功能,它只需具备较少的气候知识便能进行复杂的气象模拟,但是,要提高它的精度,必须具备足够数量的站点观测数据。对于气象数据模型模

表 1 下垫面条件国内外研究进展

下垫面	学者	采用模型	概述
植被	严超 ^[22]	大涡模拟	将中尺度气象预报模式与微尺度精细大涡模拟方法耦合,利用地表能量平衡关系考虑大气辐射等多物理过程,研究了典型天气条件下复杂森林下垫面大气流动问题。
	ScanlonTodd M. ^[23]	TOPMODEL	改进 TOPMODEL,将广义地形指数理论应用于解释地下暴雨径流衰退,藉此观察流域下垫面动态变化。
土壤	姜晓峰 ^[24]	SPAW	借助 SPAW 模型,运用样条差值等算法,消除国内与国外土壤数据制式不统一的问题,将土壤数据本土化。
	Andersen Jens ^[25]	MIKE SHE	土层厚度分为 5 个等级考虑,但是由于没有将土层厚度和地上植被的相关性考虑在内,因而模拟的水文变化图明显存在滞后的效应。

拟,国外多采取 ANUSPLIN、PRISM 和 MTCLIM-3D。3 个模型各有优劣,但是对比研究表明,这些模型模拟的结果具有相似的统计规律(见表 2)。

1.3 基于 GIS 生态水文模型遥感信息优化

遥感技术与地理信息技术的结合使大范围提取生态环境的空间异质性成为可能。在生态水文领域,最明显的收益就是对于土地利用数据和地形信息的获取。土地利用方式的不同直接改变了陆地生态环境,间接导致土壤等下垫面条件变化影响水文过程。通常操作

为,利用 GIS 建立土地利用图层,与遥感数据进行叠加,同时借助 ENVI 软件加以提取与计算。值得注意的是,随着遥感技术的发展,遥感数据也在向高精度发展,这无疑会使模型精确度获得极大的提升。Jordi Etchanchu^[26]在探求分布式水文模型建立中特定轮作方式和物候对水文气象过程的影响过程的研究中,使用了来自于哨兵 2 号卫星的高分辨率图片,发现模拟蒸散量的相关系数相比较低分辨率数据提高了约 0.3。

地形信息可表达为高程、坡度、坡位、坡长、坡降、

表 2 主要气象模型原理及特点

气象模型	关键原理	主要特点	创建单位
ANUSPLIN	利用样条平滑方法对多因变量受干扰数据进行空间插值	提供综合统计分析、数据诊断和空间分布标准差计算功能	澳大利亚国立大学资源与环境研究中心
PRISM	基于地理空间特征和回归统计方法生成气候地图的模型	考虑多种因素对气象因子的影响, 根据站点所处位置赋予不同权重	美国俄勒冈州立大学空间气候研究中心
MTCLIM-3D	采用智能地形技术	具有较高的地形敏感性和空间相关性	美国蒙大纳州立大学林业学院

坡向等。在地形信息数字化后,为了适应分布式模型的计算要求,通常需要将矢量的等高线转为基于栅格的数字高程模型(DEM),除高程以外的其他的地形信息也可以通过DEM推求。因此,DEM成为水文模型的基本数据源。DEM及其数字流域的分析方法主要用于解决水文模型中的水分传输过程。即WTM水量传输模型。德克萨斯州立大学奥斯汀分校水资源研究中心是研究数字流域与水文模型的权威机构,每年在网上推出大量的研究报告(<http://cwe.engr.utexas.edu/>),并设有建立数字流域与水文模型的网上课堂。他们的模型大多是基于水文物理过程的模拟,并且和地理信息系统软件ArcGIS结合。近来推出的ArcGIS水文数据模型就是利用水文分析组件ArcHydroTools,该组件耦合到ArcGIS环境中,提供了一种可视化的水文模型开发界面。因此,从水系生成、流域划分、河道编码与拓扑关系建立完全在ArcMap(Esri, Inc.)下即可完成。

2 基于GIS生态水文模型存在的主要问题

2.1 生态水文模型的耦合点

生态水文模型的耦合点实质是连接水文过程与生态过程之间的功能关系的媒介。随着对生态水文过程机理的认知加深,学者们发现生态模型和水文模型中存有许多耦合点。其中有一部分拥有明确的物理机制,如叶面积指数、植被类型、土壤湿度等。这其中,植被的叶面积指数与植被覆盖度对水文模型中植被蒸发蒸腾和截留行为的影响^[27,28];植被的根系长度变化响应地下水埋深的变化^[29],而水文模式土壤的分层又受根系变化

影响^[30],从而地下水的分配也响应根系变化;又如土壤湿度既干扰植被的入渗作用,同时也干扰着植被的蒸腾作用。尽管有大量研究表明水分和植物生长相互影响,但是仍未能建立关于水位、水分状况与植物生长的明确定量关系,对群落演变的水文生态机理研究也十分有限^[31]。生态过程和水文过程的关系交互复杂,这是一项复杂且难以回避的问题。现阶段难以实现多耦合点生态水文模型大尺度紧密耦合,多采用共通的物理参数,通过这些参数的数据嵌套形式的初级耦合,致使模型具有极大的不确定性,且模型之间难以进行有效比较。

2.2 生态水文模型耦合方法

生态水文模型的耦合方法有单向耦合和双向耦合。以两类模型中的共有环境因子为出发点,将一个模型的输出数据输入另一个模型,实现模型间的数据共享,这种方法属于单向耦合。单向耦合显式地引入了植被层,在水文过程模拟中详细描述植被的生态过程,使得模型对水文过程的模拟更符合实际。双向耦合通过多层次的嵌套实现生态模型和水文模型之间相互反馈,在植被与水文过程的耦合体现在植被为水文模型提供动态变化的叶面积指数、根系深度、枯枝落叶层厚度等^[32],同时水文模拟为生态过程模拟提供土壤含水量的动态变化等。目前,多数相关研究应用单向耦合或部分耦合方法,借助水文模型的输出属性达到与生态模型耦合的目的。这些研究大多聚焦于将水文模型的输出数据应用于生态模型,通过遥感植被产品(如LAI、NDVI等)作为模型输入^[33,34],反映植被的变化过程。但是这种耦合方式缺乏对机理深层的认知,难以反映客观的自然现象。特别是一些生态过程对水文过程影响,

具有时空特异性和非连续性的特点,如植被的时间异质性对水文过程的影响这些问题都是松散的静态耦合方式无法解决的。

2.3 生态水文模型的尺度

尺度问题是多尺度生态水文模型建立的重点与难点,其实质是在生态水文过程或研究观测中在时空域上的特征度量。Schulze^[35]把尺度分为观测尺度(observational scale)、过程尺度(process scale)以及操作尺度(optional scale)。观测尺度在时间和空间上可以被定义包含3项要素:范围、分辨率、粒度。范围是指观测对象的发展或持续整个空间,分辨率是数据集中最基本的可区分部分,粒度指最小可辨识单元的特征如长度、面积或体积。过程尺度在时间上定义为发展或持续的时间。空间上,过程尺度一般依据过程的性质选取适当的尺度,因为其并没有很明显的自然界限,例如降水。模型的操作尺度选取依据所要解决的问题调整,因而其取决于观测尺度和过程尺度。当前生态水文模型一般有特定的尺度,由于生态水文过程通常非线性,因而模型应用存在尺度再参数化和精度等问题。各个学科采用的时空尺度不完全相同,在成果的表述上存在歧义^[36],特别是交叉学科研究日益加重的情形下,更加剧了耦合集成的困难。虽然GIS技术已取得长足的进步,对尺度转化和尺度外推具有潜在的应用价值,但目前尚未出现行之有效的理论方法。

3 基于GIS生态水文模型研究展望

生态水文模型的研究目标是建立一套适用于多尺度、多因素、多环境的耦合模型。当前从影响机制和生态机理入手,寻求更具有代表性的耦合点是相对直接模型优化方式;对耦合点的认识,优化耦合方法,建立模块化耦合模型,根据需求选择模块使模型以适宜更

多环境;通过尺度转化真正意义上消弭水文模型和生态模型的隔阂是当前生态水文模型发展的最终目标。在此3个方向上的任何一点取得阶段性突破,势必会其他两点的发展造成积极影响,如图2。

3.1 耦合点的选择

相比简单的数据共享,以生态水文机理为切入点以共通环境因素为媒介实现多个模型的结合是当前研究的焦点。选择较优耦合点是获取生态水文模型优化最主要的方法,但是过度追求耦合点优化也会导致模型的过度优化,使得模拟结果拟合程度很好,但参数超出正常阈值,失去实际意义。在水文生态过程的耦合模拟中,必然引入更多的环境参数,如土壤水、蒸散发、植被指数、作物产量。此外,随着GIS技术的成熟,克服传统难以获取数据问题,为耦合点优化提供新的研究思路。植被通过截留、蒸腾蒸发直接影响水文循环,因此植被与水循环是研究的重点。植被条件具有显著的时空特异性,使得生态水文过程具有时间性和地域性。通过应用叶面积指数、植被覆盖度、植被枯落物的物候节律体现植被影响,探寻生态水文过程形成演化的时空规律及其驱动机制,将是对耦合点进行科学选择的关键,同时是实现生态水文紧密耦合的基础。

3.2 耦合方法的调节

就目前的研究,生态水文模型软件的商业化开发是一种趋势。在此趋势下,生态水文模块化将是耦合软件研究的重点,模型模块化是解决均质和异质空间的特征描述、变化规律及形成机制的关键。对异质空间而言,更多强调其自然环境的差异性、环境因子变化规律的差异性、以及差异性的水动力学基础。以长江为例,上游区域为水量来源以大气降水、冰川融水补给为主,可在上游采用大气降雨模块及冰川溶雪模块结合生态植被模块,有针对性建立耦合模型;中下游区域水速渐缓,地下水系丰富,故在下游需结合地表径流和地下径流,统筹考虑地表水蒸散发、地层和植被特征等因素对水文过程的影响。基于此开发的功能与特征不同的模型模块具相当的普适性,以满足商业需求及研究便捷性需求。

3.3 尺度转换的标准化

尺度转换是将不同时间和空间层次上尺度联结的过程,不同尺度的系统构成中要素包含着交互联系,基于这种联系尺度转换也成为可能。尽管环境科学和其他相关科学都涉及尺度及尺度转换的问题,但并未

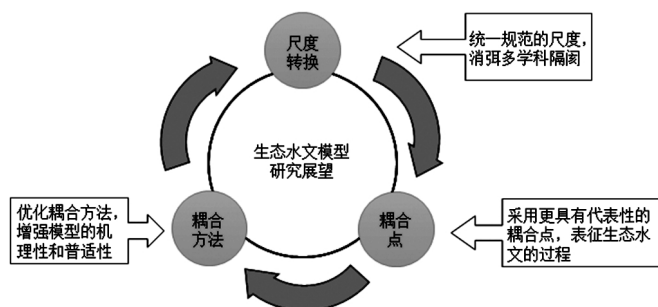


图2 生态水文模型研究展望图

有任何学科做出全面的解释。当前尺度转换未形成统一有效的理论和方法体系,因而需要对尺度转换标准化。细化来说,其一是对于尺度转换的限制性条件的规定,如尺度转换需满足何种条件,尺度转换可跨越几层尺度;其二,建立统一的尺度转换范式,或是将当前不同学者的尺度转换方式统一在一套模式体系内;其三,完善尺度大小和尺度转换效果的评价标准。相当一部分水文生态过程的数学物理模型都对尺度具有特定的要求,微观尺度、建立的生态水文模型如何普及到宏观尺度是模型模拟中亟待解决的难点,因而建立起一套统一标准的尺度将会是未来水文生态模型耦合的关键所在。

4 结 论

生态水文模型是实现生态水文学纵深发展的重要工具,根据研究的对象、目的和所掌握的条件对不同的生态水文过程、模型模式和数学方法进行耦合。目前,探索应用 GIS 技术自动提取生态与水文的有效参数,量化系统表征形式及校验模型等,使生态水文模型在准确性和可行性上取得长足的进步。但是 GIS 与生态水文模型的耦合停留在数据共享的简单耦合,尚未形成适用于多尺度、多因素、多环境的耦合模型;相关模型的建立也通常是基于实际问题出发,耦合点、耦合方法不具有通用性,生态水文模型的尺度转换也有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Crawford R M M. Eco-hydrology: Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments [J]. *Journal of Ecology*, 2000, 88 (6): 1095~1096.
- [2] 严登华,何岩,王浩,等. 生态水文过程对水环境影响研究述评[J]. *水科学进展*, 2005 (05): 747~752.
- [3] Zalewski M, McClain M. Ecohydrology, A list of Scientific Activities of IHP -V Projects 2.3/2.4 [M]. Technical Documents in Hydrology, No.21, Paris: UNESCO, 1998.1~2.
- [4] Bai Ruiqiao, Liu Xuehua, Liu Xiaofei, et al. The development of biodiversity conservation measures in China's hydro projects: A review[J]. *Environment international*, 2017, 108.
- [5] Caldarola E G, Rinaldi A M. Big Data Visualization Tools: A Survey-The New Paradigms, Methodologies and Tools for Large Data Sets Visualization[C]. International Conference on Data Science. 2017.
- [6] 阎国年,张书亮,龚敏霞. 地理信息系统集成原理与方法[M]. 科学出版社, 2003.
- [7] Adam J Vanbergen, the Insect Pollinators Initiative. Threats to an ecosystem service: pressures on pollinators[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2013, 11 (5).
- [8] 刘红玉,李兆富. 海滨湿地景观过程模型研究的理论基础与概念框架[J]. *生态学杂志*, 2013 (10): 293~300.
- [9] 李宗梅. 区域水文生态模型 (RHESSys) 的灵敏度分析[D]. 中国科学院研究生院, 中国科学院大学, 2010.
- [10] 曾思栋,夏军,杜鸿,等. 生态水文双向耦合模型的研发与应用: I 模型原理与方法[J]. *水利学报*, 2020, 51 (01): 33~43.
- [11] Fereidoon M, Koch M. SWAT-MODSIM-PSO optimization of multi-crop planning in the Karkheh River Basin, Iran, under the impacts of climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 502~516.
- [12] Golmar G, Shiv P, Ali M, et al. Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT[J]. *Hydrology*, 2014, 1 (1): 20~39.
- [13] 魏玲娜,陈喜,王文. 基于水文模型与遥感信息的植被变化水文响应分析[J]. *水利水电技术*, 2018, 50 (6): 18~28.
- [14] Lei L I, Zongxue X U, Hydrology B O. A grid-based integrated surface-groundwater distributed hydrological model (GISMOD): development and application [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2014, 55 (6).
- [15] Ju W, Gao P, Wang J, et al. Combining an ecological model with remote sensing and GIS techniques to monitor soil water content of croplands with a monsoon climate [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97 (8): 0~1231.
- [16] 李丽,王心源,骆磊,等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. *生态学杂志*, 2018, 37 (04): 1233~1245.
- [17] Jan Peters, Bernard De Baets, Niko E.C. Verhoest. Random forests as a tool for ecohydrological distribution modelling [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 207 (2~4): 304~318.
- [18] Drewry D T, Kumar P, Long S, et al. Ecohydrological responses of dense canopies to environmental variability: 1. Interplay between vertical structure and photosynthetic pathway [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 115 (G4): 985~989.
- [19] 刘昌明,李道峰,田英,等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22 (5): 437~445.
- [20] 孙鹏森,刘世荣. 大尺度生态水文模型的构建及其与 GIS 集成[J]. *生态学报*, 2003 (10): 2115~2124.

- [21] 吴燕锋, 章光新. 湿地生态水文模型研究综述 [J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2588~2598.
- [22] 严超, 苗世光, 刘郁珏, 等. 森林下垫面大气环境多尺度模拟研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(06): 775~792.
- [23] Scanlon T M, Ruffensperger J P, Hornberger G M, et al. Shallow subsurface storm flow in a forested headwater catchment: Observations and modeling using a modified TOPMODEL [J]. Water Resources Research, 2000, 36(9): 2575~2586.
- [24] 姜晓峰, 王立, 马放, 等. SWAT 模型土壤数据库的本土化构建方法研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(11): 135~138.
- [25] Andersen Jens, Refsgaard Jens C, Hensen, et al. Distributed hydrological modeling of the Senegal River Basin—model construction and validation [J]. Journal of Hydrology, 2000, 247: 200~214.
- [26] Etchanchu J, Rivalland V, Gascoin S, et al. Effects of multi-temporal high-resolution remote sensing products on simulated hydrometeorological variables in a cultivated area (southwestern France)[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2017, 21(11): 1~23.
- [27] 孙景生, 康绍忠, 王景雷, 等. 沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005(11): 28~32.
- [28] 孙彩红, 苏泳娴, 韩留生, 等. 广东省 2004–2016 年植被冠层降雨截留模拟及时空特征分析——基于 MODIS 叶面积指数[J]. 生态学报, 2020(07): 1~15.
- [29] 王雅梅, 张青青, 李骊, 等. 新疆克里雅河下游植被与地下水埋深关系初探[J]. 干旱区研究, 2020, 37(03): 562~569.
- [30] 鲁建荣, 张奇, 李云良, 等. 鄱阳湖典型洲滩湿地植物根系对水分垂向通量的影响 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(05): 2180~2189.
- [31] 曾思栋, 夏军, 杜鸿, 等. 生态水文双向耦合模型的研发与应用: II. 模型应用[J]. 水利学报, 2020, 51(04): 439~447+457.
- [32] 张喜旺, 吴炳方. 基于中高分辨率遥感的植被覆盖度时相变换方法[J]. 生态学报, 2015, 35(04): 1155~1164.
- [33] 白兰东, 苟叶培, 邵文文, 等. 基于多角度遥感的植被指数与叶面积指数的线性关系研究[J]. 测绘工程, 2016, 25(01): 1~4+9.
- [34] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(07): 774~782.
- [35] Roland Schulze. Transcending scales of space and time in impact studies of climate and climate change on agrohydrological responses [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2000, 82(1~3): 185~212.
- [36] 李双成, 蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 11~18.

编辑: 张绍付

Progress of ecological hydrological model based on geographic information system

ZHANG Yi, JI Yong, WANG Kai, LIU Xingchen, YANG Junfei

(College of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology,
Nanchang 330099, China)

Abstract: On the basis of clarifying the concepts of ecological hydrology and ecological hydrological model, the research progress of GIS-based ecological hydrological model data set optimization is emphasized, and the significant problems existing in the related research of ecological and hydrological coupling based on GIS are discussed, namely scale conversion, coupling points and coupling methods. Aiming at the current problems, the future development direction of the eco-hydrological model is elaborated. The establishment of large-scale and widely applicable ecological hydrological models will be the focus of future research.

Key words: Geographic information technology; Eco-hydrological; Scale conversion; Coupling point; Coupling method

翻译: 张翼