

DOI: 10.5846/stxb201506171226

李玉凤, 刘红玉, 皋鹏飞, 季香. 农村多水塘系统水环境过程研究进展. 生态学报, 2016, 36(9): - .

Li Y F, Liu H Y, Gao P F, Ji X. Agricultural multi-pond systems and their hydrological processes: A review. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): - .

农村多水塘系统水环境过程研究进展

李玉凤, 刘红玉*, 皋鹏飞, 季 香

江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

摘要:农村多水塘系统由于其不可替代的水资源蓄积和营养物去除功能, 广泛分布于我国东部和南部地区。在分析多水塘系统水环境过程研究进展的基础上, 指出了目前多水塘系统水环境过程研究中的不足及未来发展趋势。关于多水塘系统的研究主要从两个尺度展开, 分别是生态系统尺度和景观尺度。(1) 基于生态系统尺度的多水塘系统水环境过程研究主要表现在两方面。首先, 多水塘系统在改变区域水文情势上发挥着重大作用。多水塘系统能有效降低流速, 且增加地表径流的滞留时间; 其次是对多水塘系统水质的研究, 主要包括水塘对污染物截留降解能力的研究、水塘底泥和水体之间营养物形态转化和输移机制的研究。(2) 基于景观尺度的多水塘系统水环境过程模型研究主要包括构建经验模型和机制模型两方面。经验模型主要是利用统计分析方法分析景观格局与水环境之间关系; 适用于农村多水塘系统的水环境机制模型主要包括国外的 SWAT、HSPF、DRAINWAT 和 TOPMODEL 模型。农村多水塘系统的研究可以为建设生态新农村提供科学依据。

关键词:多水塘系统; 水环境过程; 模型模拟; 景观尺度

Agricultural multi-pond systems and their hydrological processes: A review

LI Yufeng, LIU Hongyu*, GAO Pengfei, JI Xiang

Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: Agricultural multi-pond systems, typical of the landscape of China, have been documented historically for 3,000 years. As small-water conservancy projects, multi-pond systems are widely distributed in southern China. They comprise a large artificial irrigation network system, composed of many tiny ponds, scattered in agricultural fields and connected by ditches and streams. They perform a key function in hydrological regulation and mass cycling. In recent decades, there have been many studies on the ecological process of multi-pond systems. Based on the review of multi-pond systems and their hydrological processes, the main study of multi-pond systems can be divided into two aspects: ecosystem and landscape scales. (1) For ecosystem scales, the change of hydrological processes and the nutrient recirculation were developed. Local hydrological cycling was changed, and the ponds could control flooding rate and increase terminal dwell times of runoff. However, the multi-pond system has other ecological functions that clean up water quality, i.e., sediment and nutrient retention. (2) For landscape scales, we reviewed examples of empirical models and potential mechanistic modeling tools that could be applied to further advance scientific understanding. Statistical models allow a steady state analysis that links landscape characteristics to watershed hydrology and water quality data. However, mechanistic watershed models are structured to dynamically link landscape features to downstream hydrological and biogeochemical processes. Here we discuss a subset of watershed models readily adaptable to address multi-pond connectivity questions, including the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Hydrological Simulation Program FORTRAN (HSPF) model, DRAINmod for WATershed

基金项目:国家自然科学基金项目(41401205); 江苏省自然科学基金项目(BK20140921); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(164320H116); 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心资助

收稿日期: 2015-06-17; 修订日期: 2015-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lhy8589@163.com

model (DRAINWAT), and TOPMODEL model. In watersheds with a sufficiently dense distribution of ponds, the hydrologic functions they provide could have important implications for flood regulation and mitigation of the future effects of climate and land use change. With the recognized function of multi-pond systems, the focus was on the hydrological module of ponds, and this was developed to enhance the models above. Based on the review of multi-pond systems, there were some shortages of studies between multi-ponds and their ecological process, including the following aspects. Firstly, analyses on ecological scales were based on the cycling mass in one pond and typically used field measurements to elucidate the source of a dissolved element in surface waters by accounting for all known sources, losses, or sinks. However, pond connectivity was often overlooked. In a landscape context, thousands of ponds are connected in a large network to provide ecological function at a regional scale. Secondly, several empirical methodologies hold the potential to improve the accuracy of mechanistic modeling approaches by providing parameter value estimates. Empirical methodologies, such as similar statistical approaches, could therefore highlight important factors associated with ponds (e.g., maximum and minimum volumes and surface depression storages, distance to stream network) that influence flow and highlight important variables to accurately parameterize the distributed landscape-scale mechanistic models. Thirdly, the research of multi-pond systems in China always depended on the foreign models, which cannot accurately reflect the characteristics of systems in China.

Key Words: multi-pond systems; hydrological process; modeling methods; landscape scale

农村多水塘系统是指多而小的水塘通过水沟相连形成的湿地系统,它作为一种特殊的人工湿地,是我国存在 3000 多年的典型农业水利工程,广泛分布于我国东部和南部地区^[1]。20 世纪 60—70 年代,大量水塘的修建,为改革开放后我国农业的发展做出了巨大的贡献。多水塘系统作为农村景观组分,能够显著地降低径流速度、贮存降水及暴雨径流,其所蓄积的水资源在灌溉期回归农田,得以循环利用,在农业发展过程中具有不可替代的作用和价值^[1]。

然而,由于缺乏对农村多水塘系统在水环境过程与功能维持方面的深入研究,在农业发展过程中,很多年久失修的水塘被淤泥填平,其蓄洪抗旱、截污去垢等生态功能得不到充分发挥。近年来,我国东南部洪灾、旱灾、面源污染等问题更加突出^[2-3],这与区域多水塘系统功能退化存在密切关系^[4-5]。当今,十八届三中全会提出“鼓励并扶持发展规模化农业”、2015 年一号文件中“围绕建设现代农业,加快转变农业发展方式”,农村将面临新的土地格局调整与规模化、现代化发展,如何有效利用农田景观中的多水塘系统,为农业可持续发展服务,成为亟待解决的科学问题。在此背景下,本文对多水塘系统格局与水环境之间关联关系、影响过程与机理等方面研究进行了综述,并针对该方面研究存在的问题,提出了未来研究的趋势。

1 生态系统尺度下农村多水塘系统与水环境

水塘属于典型的农村人工湿地,其在农业水利中的应用具有鲜明的中国特色^[6]。水塘与水塘之间通过水沟相连形成多水塘系统。在降水-径流过程中,水流沿着水沟经过一系列水塘最终汇入目标水体(河流/湖泊/水库)。在农业需水期,多水塘系统作为农业灌溉水源,用于农田灌溉,实现生态循环。多水塘系统增加了干湿界面的比例,改变了区域的水文过程。在连续降水产生径流时,由于多水塘系统可以改变地表水文条件,从而可以有效地拦截、去除地表径流输出的营养物质^[7-8]。

1.1 多水塘系统对区域水文情势的影响

水塘的存在在地表形成径流的沉积汇点,使流域的水文模式发生明显改变。首先,地表径流在通过水沟流进一系列水塘的过程中,流速大大降低,停留时间显著延长。由于水塘的存在,径流流速从入塘前的 34.8 cm/s 减少到出口处的 0.8 cm/s,径流流速降低的幅度可能与水塘的植被盖度和容积有关^[1]。其次,多水塘系统可以消减流域洪峰流量。Nicholas L^[9]对美国中西部 29 个流域中水塘的水文响应进行研究,其结果表明,流域内水塘所占的面积比与洪峰流量具有显著负相关关系,地表径流滞留时间可以有效地预测丰水流量。再

者,多水塘系统保障农业供水方面发挥着重要作用,人为管理改变了地表水自然循环的方式和路径^[10]。水塘通过输水渠道相互连接,形成大中小、蓄引提相结合的灌溉系统,可以有效提高水塘的复蓄次数及蓄灌能力,增加水资源的利用率、减缓营养物流失。

1.2 多水塘系统对水体水质的影响

区域内水塘分布对提高目标水体水质具有明显的作用,尽管截留率不尽相同,但是水塘最高可以截留污染水体中 99% 的氮和 75% 的磷^[11]。Mitsch 等^[12]研究表明,只要建立或恢复占 Mississippi 河流域面积 0.7%—1.8% 的湿地,就会显著削减进入墨西哥湾的氮负荷。Arheimer 等^[13]对瑞士南部流域研究表明,恢复占流域 0.4% 的 40 块湿地能够减少 6% 氮素进入海岸带。在我国南方多水塘湿地系统的研究表明,水塘和水沟对悬浮物、溶解态磷和总磷具有较强的截留作用。在单个水塘中,悬浮物、溶解态磷和总磷平均降低了 42.4%、15.8% 和 34.1%。除此之外,沟渠能够吸收水中氮磷污染物,植草沟渠对磷素的去除率高达 90%—95%^[14],非植草的农田排水沟也能够有效地降低硝氮和氨氮的浓度,对可溶性无机氮的截留率达 57%,对磷素的截留率为 43.92%^[15]。水塘与水塘之间通过沟渠相连形成复杂的网络结构,当水流通过该网络时,会发生多次过滤和沉淀,多水塘系统对悬浮物、溶解态磷和总磷的降低率比单个水塘的降解率有明显提高,多水塘网络体系比单水塘或沟渠具有更高的截留效率^[1,16]。

另外,水塘与水塘之间通过沟渠连接形成普遍连通的网络,对于该网络结构特征与水环境之间的关系也是生态系统尺度下多水塘研究的重要内容。水塘和沟渠在整个流域中的布局对水文形势和水质净化都起到关键性的作用。“串联式”、“并联式”、“串并联混合式”的多水塘网络对地表径流的流速、流量和水质净化效率差异明显。研究表明,与“串联式”和“并联式”的多水塘网络结构相比,“串并联混合式”的网络特点更加有利于改善水质^[17]。

2 景观格局与水塘水环境关系模型

多年来,景观格局与湿地水环境关系是水文学、生态学、环境科学和景观生态学等学科的研究热点,涌现出一大批经验模型和机理模型^[18]。多水塘系统作为一种人工湿地,其集水区内景观格局与水环境之间的关系研究也备受关注。本文主要从经验模型和机理模型两方面阐述景观尺度下,水塘集水区内景观结构的差异与水环境的响应关系。

2.1 基于经验模型的景观格局与水塘水环境关系研究

随着景观生态学的发展,景观结构和过程之间的关系已经成为研究的热点。基于经验模型的景观格局变化与水环境效应研究也取得了不少研究成果。从建模方法看,景观格局-水质关系研究主要采用统计学中的线性模型方法,即将景观指标作为解释变量,水质指标作为响应变量,建立回归估计方程,从而对景观结构变化引起的水质变化进行分析和检验^[19]。也可采用因子分析、典范变量分析等手段进行自变量的筛选、分类、排序,从而考察自变量的作用大小^[20]。研究结果表明,水塘水质对景观格局变化非常敏感^[21]。当流域内不透水面积达到整个集水区面积 10%—30%,水质下降明显^[22]。除了景观面积对水环境有响应关系外,集水区内其他景观指数也可以有效地反映水塘水质变化特征^[23-24]。流域内斑块密度、斑块聚集度、景观破碎化等景观指数对水环境的影响具有明显的季节效应^[25]。景观破碎化程度越高则对水质负面影响越大,而林地越为集中则越有利于促进水质改善^[26],景观指标总体能够解释 40%—50% 的水质变化,例如总氮变化的 65%—86%、溶解磷和悬浮物变化的 73% 和 79%,能够由景观指数变化来解释^[27]。基于经验模型的景观格局与水塘水环境的研究为从机理上认识水塘水环境的影响因素提供了有效的技术方法。

2.2 景观尺度下机理模型在水塘水环境模拟中的研究

在景观尺度,基于机理模型的水环境模拟研究大多是依托非点源污染模型展开和深入的^[28]。欧美发达国家对降雨径流引起的非点源污染重视较早,已经建立了较多有针对性的区域水环境污染机理模型^[29]。在以往模型设计和开发的过程中,由于数据源空间分辨率的限制,往往忽视了流域内水塘在物质循环中的作用。

而根据最新研究进展,将流域中的水塘系统逐渐纳入流域生态过程中的模型有 SWAT、HSPF、DRAINWAT、TOPMODEL^[30]模型等。这些模型通常由降雨径流过程、土壤侵蚀过程和化学物质转化运移过程组成,能够描述流域尺度上多水塘系统水文要素和污染物质的时空差异^[31]。

(1)SWAT 模型

SWAT 模型是一种应用广泛的半分布式流域模型,该模型是评估不同土地利用和不同农业管理措施影响下流域内的水文、泥沙、化学物质等的形成与输移状况^[32]。SWAT 水文子模块中包括子流域、水库和沟渠径流路径等方面。在子流域中,SWAT 使用修正曲线的方法模拟多向水流的状态,包括地表径流,渗流,侧向潜流,地下水流动,蒸发,和传输的损失。SWAT 将流域内的具有相似土地利用类型、土壤水分和坡度的子流域划分为一种水文响应单元(HRU)。同一类 HRU 中的模型参数被统一设定。

对于 SWAT 模型的应用,最新进展中考虑到子流域中水塘的蓄水作用,并利用模型参数修正不同子流域中水塘的潜在蓄水能力,且考虑水塘在地表径流和地下径流中的作用。例如,SWAT 模型可以对水文响应单元中的水塘进行参数设定。Wang 等^[33]在 SWAT 模型的基础上,提出了等效水文湿地(HEW)的概念。HWE 概念涉及 4 个关键参数:① HWE 的集水区面积;② HWE 的面积;③ HWE 的平均水位;④ HWE 平均库容量。HWE 参数的设定的主要任务是识别小流域内主要水塘的水文功能。这一概念及方法的提出将多水塘系统有机融合到 SWAT 模型中。SWAT 最新版本在每个水文单元中都添加了“pothole”模块(如:水塘面积、蓄水量等),这有助于了解水塘对在整个流域水文情势的影响。但是该模块还需要进一步的考虑不同流域位置的水塘在水文响应中的影响。

SWAT 模型除了在模拟多水塘系统对整个流域水文情势的改变之外,还越来越多地被用于流域水环境营养物负荷的模拟。但总体而言,SWAT 对水环境污染负荷的模拟精度低于其对水文过程的模拟。究其原因一部分是未考虑到流域内部低洼区(如:水塘、小型水库等)对营养物质的截留作用。但是随着流域内水塘截污功能逐步被认识,SWAT 模型在模拟流域营养物输出量的基础上研究了水塘、水库对流域河流中营养物输出量的影响,指出水塘、水库大小和位置的变化对流域营养物输出量的影响非常显著^[34]。因此,目前 SWAT 能普遍达到有效模拟流域的水环境污染过程和状况,并为最优方案决策提供定量分析和判断依据。

表 1 多水塘系统水文模块在各流域模型中的对比^[35]

Table 1 Compared with the hydrological sub-modules of multi-ponds in different watershed flow models					
模型 Model	水文方法 Hydrologic approach	优点 Advantages	缺点 Limitation	公开软件 Model files publically accessible	在线用户手册 Available online user manual
SWAT	利用半分布式水文响应单元修改径流曲线数(SCS-CN)	利用 HEW 方法能够将多水塘系统有效地集成到模型中	不适合地下水位较高的区域;每个水塘的参数都要设置;水塘在流域中的位置没有考虑	有	有
HSPF	半分布式模型主要体现在地表产流的过程上	利用 RCHRES 模型来表述多水塘系统水文过程	不适合地下水位较高区域内水塘水文过程模拟	有	有
DRAINWAT	基于 DRAINMOD 坡面流量;地表瞬时单位流速曲线	可以将已知参数导入到 DRAINWAT 模型中	不适合坡度较大区域内水塘水文过程模拟	无	无
TOPMODEL	半分布式变动产流面积的方法	可以模拟水塘长期水文变化过程,并能识别其在空间上的差异	不适合地下水位较高区域内水塘水文过程模拟	有	有

(2)HSPF 模型

HSPF 模型是美国环境保护总署开发的一个半分步式水文模型,该模型利用河流水文动力学的经验模型

模拟河流水量和水质的变化过程^[36]。HSPF 模型被成功地运用到各种面积不等的流域中,其目的是评价沉积物和营养盐的传输对目标水体的影响。HSPF 模型包括 3 个主模块,它能对透水地面、不透水地面、完全混合型河流、湖泊和水库这 3 种不同性质的地表水文水质过程进行模拟。HSPF 水文模拟包括 3 种径流类型:地表径流、土壤表层流和地下水径流。

HSPF 模型的二次开发的过程中比较关注特殊的水文单元(水塘等人工湿地)对径流过程的影响。水体截留(RCHRES)子模块的开发能够较好地考虑水塘在整个水文过程中所起的作用^[37]。该子模型需要水塘的深度、面积和容积量等数据,这些数据可以通过野外调查得到,也可以通过基于 LIDAR 数据的 DEM 获取。RCHRES 子模块由 3 部分水文组件构成。第一种是河岸带水塘,这种类型的水塘与河流水文连通性很高;第二种是地理上孤立的水塘,这种湿地在丰水期所产生的溢流会影响下游河流,从而与之产生间接的水文连接;第三种是沟塘网络系统,该系统是连接流域水塘与河流的重要组成部分,也表明了流域的径流路径^[37-38]。因此,RCHRES 子模块将水塘作为蓄水节点,能够模拟出每个水塘的溢流及其与地下水之间的关系。Said 等人^[39]利用 HSPF 中的 RCHRES 模块模拟佛罗里达州夏洛特港的浅滩内水塘与水塘之间的水文关联。同时,Zhang 等人^[40]利用 RCHRES 模块模拟在佛罗里达州 Peace 河流域内水塘与水塘之间的水文连接度问题。

HSPF 模型污染物迁移模块考虑复杂的污染物平衡,对污染物迁移转化过程的描述细致入微,可以模拟输出 BOD、DO、营养盐、农药等多种污染物负荷^[41]。HSPF 模型对氮、磷营养盐的模拟考虑了氮、磷在多种环境介质之间的迁移转化过程,主要是氮、磷在土壤和水体中的传输和反应过程^[36]。在污染物模拟中,研究主要集中在土地利用差异对水质的影响^[42]。针对流域内水塘等蓄水节点在污染物传输中的截留作用考虑较少。

(3) 流域的 DRAINMOD 模型(DRAINWAT)

DRAINWAT 水文地理学模型^[43]是 DRAINMOD 模型在流域尺度应用版本,模型开发的最初目的是模拟地势平坦区域内排水不良的情况下农村排水系统的设计和水资源管理对水文条件的响应^[35]。DRAINWAT 模型集成了 DRAINMOD 模型的两大基础模块:田间尺度下基于森林水文条件而修订的 DRAINLOB 模块^[44]和农业流域尺度下的 FLD & STRM 模块^[45]。DRAINWAT 模型已经被用于超过 100 km²的流域中,且在农业、森林、混合土地利用类型的流域内模拟了水文过程、营养物流失等。但是,DRAINWAT 模型只适合用于坡度变化较小、地下水位较高的且排水不良的农村流域。

DRAINWAT 模型在流域水塘水环境模拟方面的研究近年来也逐渐增多。Chescheir^[46]等人利用 DRAINWAT 模拟把面积为 1.4km²的水塘作为一个集水区进行了模拟,模型在考虑水塘对整个流域水文水质影响的过程中,需要涉及众多的参数,包括:水塘蓄水量、沟渠网络系统和土壤的物理性质等。另外,DRAINWAT 的用户可以根据水塘对水文条件的影响将其划分成多个 0.002km²左右的低洼地,这些低洼地有统一的参数系统,如:用来描述次降水事件中,微地形条件下地表蓄水能力的 STMAX 单元。在应用模型的过程中,根据水塘的大小和深度,将水塘分成若干个 20—30cm 深(相比于其他用地类型)的 STMAX 单元^[46-47],并对这些单元进行概化后加入整合到整个流域水文水质模拟中。这种方法可以用于预测低蒸发量区域次降水过程中水塘水位的变化。理论上,利用 STMAX 单元模拟水塘在流域水文水质中的作用将进一步被验证。

(4) TOPMODEL 模型

TOPMODEL 是一个以地形为基础的半分布式流域水文模型^[48]。该模型的最大特点就是水文条件的变化完全依赖于地形特征的变化。因此, TOPMODEL 经常被用在地形起伏较大的区域。TOPMODEL 模型的理论基础是变动产流面积的概念,而且对地表和地下产汇流都进行了考虑。水量平衡方程式模型的核心部分,该方程是通过计算土壤饱和差得到,或理解为将地下水位抬升至地表所需的水量。水量平衡是将小流域内土壤、截留池都作为“储水库”来计算,然后再通过径流路径将不同的“库”连接到一起,建立水量平衡方程。该模型被认为是半分布式,是因为它通过地形指数来对流域的异质性进行描述和利用,但同时它的参数又把整

个流域看作同质性对待(即流域内采用相同的参数)。该模型的主要特征是利用地貌指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 来反映流域水文现象(α 表示坡面面积, $\tan\beta$ 表示栅格单元的坡度), 特别是径流运动的分布规律。

TOPMODEL 模型的潜在应用在于其能够模拟水塘之间的水文连接度。在地下水位较浅的流域内, TOPMODEL 具有利用 qsrp 水文插件模拟水塘水文动力的条件。在这个水文插件中, 降水或是直接变成地表径流, 或是逐渐渗透成为浅层地下水。假设浅层地下水是流向下游的河流或沟渠, 那么上游水塘与下游河流或沟渠便产生了水文联系。TOPMODEL 模型中的地貌指数有利于水塘制图和反演^[49]。例如, 具有高地貌指数的区域极有可能发生地表溢流的现象, 也是潜在地下水溢流区域, 这些高地貌指数的区域通常是水塘所在地^[49]。可以通过流域内地貌指数的空间分布来评价地貌指数的梯度变化, 进而反映水塘水文条件的变化情况。利用 TOPMODEL 模型模拟水塘之间水文连接度时, 需要注意的关键点是所有的水体(水塘、湖泊或其他湿地类型)的水文过程都被认为是相似的。因此, TOPMODEL 模型在湿地类型较为单一(如多水塘系统)的区域具有很好的模拟效果。

3 农村多水塘系统水环境过程研究存在的问题及发展趋势

3.1 农村多水塘系统水环境研究存在的问题

从目前生态系统尺度的研究可见, 对多水塘系统与水环境关系的研究多集中在单个水塘内部生态系统尺度结构与功能的研究上, 而水塘与水塘之间相互连通的现象是普遍存在的。因此, 把水塘作为离散的个体去研究是不够的。因此, 开展多水塘系统网络格局与水环境关系研究是深化多水塘系统研究的重要方面。

在景观尺度下, 虽然基于经验模型的流域景观格局与水塘水质关系的研究已经取得了丰硕成果, 但同时也走入了困境。究其原因是因为景观格局与水塘水环境之间并无直接联系, 通常是通过降水事件使两者发生关联, 经验模型较长时间尺度与降水过程较短时间尺度相冲突, 使其研究难以深入开展。但是基于经验模型的研究成果可为机理模型的构建提供基础支撑, 使进一步深入探讨流域内湿地景观分布、配置及空间变化与目标水体水环境之间的关系成为了可能。目前对多水塘系统水环境过程机理模型的研究还存在诸多问题, 其模拟主要集中在对水文情势的模拟, 对水质的模拟还处在初步阶段。另外, 在建模过程中缺乏对地表水和地下水之间的耦合机制研究, 而该部分是模型准确性的重要体现。

3.2 农村多水塘系统水环境研究的发展趋势

针对农村多水塘系统水环境研究存在的问题, 今后该方面的研究主要体现在一下几方面:

(1) 多水塘生态系统内部的机制研究。多水塘生态系统尺度的水环境过程研究包括单个水塘内部的物质循环、水塘与沟渠之间的物质迁移及水塘与水塘之间的水文联系与物质传输。深入认识和研究多水塘系统网络结构中的物质迁移是开展较大尺度研究的基础。

(2) 多水塘流域地表水与地下水之间的水量与水质交互作用是影响湿地水文过程及其机理模型构建的重要因素。目前对于流域机理模拟研究一般通过单一的水文过程来实现, 水塘的蒸散发、地表水与地下水之间的耦合、水量与水质之间的关系等信息难以在模型中得到准确的反映。考虑水塘水文特性的流域水文过程综合模拟模型是未来发展的方向, 单一水文过程模型向地表水与地下水耦合、水量水质联合模拟模型转变, 成为指导多水塘地区水资源综合管理和生态保护实践的重大需求。

(3) 景观格局在多水塘水文模型中的应用。由于景观格局与水环境过程之间关系的复杂且不确定性大, 纯机理模型在诠释景观格局与水环境关系方面还不够。此际, 经验模型在模型构建中扮演着不可或缺的角色, 今后将揭示景观格局与水环境之间关系的经验模型嵌入到机理模型中, 建立多水塘系统水环境过程模型。以机理模型为主导, 经验模型嵌入的模式是传统景观格局与水环境关系研究走出困境的有效方法。

参考文献 (References):

- [1] Yin C Q, Shan B Q. Multipond systems: a sustainable way to control diffuse phosphorus pollution. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2001, 30(6): 369-375.

- [2] 高俊峰. 太湖流域土地利用变化及洪涝灾害响应. 自然资源学报, 2002, 17(2): 150-156.
- [3] 廖永丰, 赵飞, 王志强, 李博, 吕雪峰. 2000-2011 年中国自然灾害灾情空间分布格局分析. 灾害学, 2013, 28(4): 55-60.
- [4] 农村水利建设: 小水利才是硬道理. [2010-03-10]. <http://news.sohu.com/s2010/dianji395/>.
- [5] 农村小水利“欠账”急需补. 南方日报. [2013-09-11]. http://epaper.nfdaily.cn/html/2013-09/11/content_7224974.htm.
- [6] 李玉凤, 刘红玉, 朱丽娟, 郝敬峰. 农村多水塘系统中污染物来源评价——以陈集镇为例. 南京师大学报: 自然科学版, 2009, 32(1): 136-140.
- [7] 李兆富, 刘红玉, 李恒鹏. 天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究. 环境科学, 2012, 33(11): 3753-3759.
- [8] 毛战坡, 王世岩, 周晓玲, 刘畅. 六岔河流域多水塘-沟渠系统中土壤养分空间变异特征研究. 水利学报, 2011, 42(4): 425-430.
- [9] Nicholas J L. Impacts of small water bodies on the hydrological response of small agricultural watersheds [D]. Carbondale: Southern Illinois University, 2010.
- [10] 王庆. 江淮丘陵易旱地区塘坝系统可供水量的计算研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [11] González-Sanchis M, Murillo J, Cabezas A, Vermaat J E, Comín F A, García-Navarro P. Modelling sediment deposition and phosphorus retention in a river floodplain. Hydrological Processes, 2015, 29(3): 384-394.
- [12] Mitsch W J, Day J W Jr, Gilliam J W, Groffman P M, Hey D L, Randall G W, Wang N M. Reducing nitrogen loading to the gulf of Mexico from the Mississippi River Basin: strategies to counter a persistent ecological problem. BioScience, 2001, 51(5): 373-388.
- [13] Arheimer B, Wittgren H B. Modelling nitrogen removal in potential wetlands at the catchment scale. Ecological Engineering, 2002, 19(1): 63-80.
- [14] Meuleman A F M, Beltman B. The use of vegetated ditches for water quality improvement. Hydrobiologia, 1993, 253(1/3): 375-375.
- [15] Moore M T, Kröger R, Loke M A, Cullum R F, Steinriede R W Jr, Testa III S, Lizotte R E Jr, Bryant C T, Cooper C M. Nutrient mitigation capacity in Mississippi Delta, USA drainage ditches. Environmental Pollution, 2010, 158(1): 175-184.
- [16] Mao Z P, Yin C Q, Shan B Q. Spatial and temporal variability of agricultural pollutants in an agricultural headwater stream within a multi-pond system, southeastern China. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(4): 697-704.
- [17] 彭世彰, 高焕芝, 张正良. 灌区沟塘湿地对稻田排水中氮磷的原位削减效果及机理研究. 水利学报, 2010, 41(4): 406-411.
- [18] Srivastava P, Migliaccio K W, Simunek J. Landscape models for simulating water quality at point, field, and watershed scales. Transactions of the ASABE, 2007, 50(5): 1683-1693.
- [19] Wang R Z, Xu T L, Yu L Z, Zhu J J, Li X Y. Effects of land use types on surface water quality across an anthropogenic disturbance gradient in the upper reach of the Hun River, Northeast China. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(5): 4141-4151.
- [20] 郝敬峰. 城市化区域景观多功能特征与湿地水环境效应研究——以南京仙林新市区为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2012: 100-107.
- [21] 李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 曹晓, 胡俊纳. 农村小流域景观结构与水质耦合关系分析——以仪征市陈集镇为例. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 15-19.
- [22] Dextrase A J, Mandrak N E, Schaefer J A. Modelling occupancy of an imperilled stream fish at multiple scales while accounting for imperfect detection: implications for conservation. Freshwater Biology, 2014, 59(9): 1799-1815.
- [23] Amiri B J, Nakane K. Modeling the linkage between river water quality and landscape metrics in the Chugoku District of Japan. Water Resources Management, 2009, 23(5): 931-956.
- [24] Tu J. Spatially varying relationships between land use and water quality across an urbanization gradient explored by geographically weighted regression. Applied Geography, 2011, 31(1): 376-392.
- [25] Zhou T, Wu J G, Peng S L. Assessing the effects of landscape pattern on river water quality at multiple scales: a case study of the Dongjiang River watershed, China. Ecological Indicators, 2012, 23: 166-175.
- [26] Lee S W, Hwang S J, Lee S B, Hwang H S, Sung H C. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. Landscape and Urban Planning, 2009, 92(2): 80-89.
- [27] Jones K B, Neale A C, Nash M S, Van Remortel R D, Wickham J D, Riitters K H, O'Neill R V. Predicting nutrient and sediment loadings to streams from landscape metrics: A multiple watershed study from the United States Mid-Atlantic region. Landscape Ecology, 2001, 16(4): 301-312.
- [28] 金卫斌, 李百炼. 流域尺度的景观—水质模型研究进展. 科技导报, 2008, 26(7): 72-77.
- [29] 郝振纯, 李丽, 王加虎, 罗健. 分布式水文模型理论与方法. 北京: 科学出版社, 2010.
- [30] Office of Water, EPA, USA. National management measures for the control of nonpoint pollution from agriculture. [2003-06-12]. <http://yosemite.epa.gov/water/owrcatalog.nsf/7322259e90d060c885256f0a0055db68/cc8f6106f339a03a85256dad00660347!opendocument>.
- [31] 张超. 非点源污染模型研究及其在香溪河流域的应用[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [32] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. Soil and water assessment tool theoretical documentation, Version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Experiment Station, Texas, 2005.

- [33] Wang X, Yang W, Melesse A M. Using hydrologic equivalent wetland concept within SWAT to estimate streamflow in watersheds with numerous wetlands. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 2008, 51(1): 55-72.
- [34] Bosch N S. The influence of impoundments on riverine nutrient transport; An evaluation using the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of Hydrology*, 2008, 355(1/4): 131-147.
- [35] Golden H E, Lane C R, Amatya D M, Bandilla K W, Kiperwas H R, Knightes C D, Ssegane H. Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems; a review of select modeling methods. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 53: 190-206.
- [36] Bicknell B R, Imhoff J C, Kittle J L Jr, Jobes T H, Donigan A S Jr. *Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF): User's manual for release 12*. GA/Reston, VA: U. S. Environmental Protection Agency, 2001.
- [37] Geurink J, Trout K, Ross M. Introduction to the integrated hydrologic model (IHM)//*Proceedings of the 3rd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*. Reno, Nevada: FIHMC, 2006.
- [38] Zhang J, Ross M A, Geurink J. Discretization approach in integrated hydrologic model for surface and groundwater interaction. *Chinese Geographical Science*, 2012, 22(6): 659-672.
- [39] Said A, Ross M, Trout K, Zhang J. Simulation of surface water for Un-gauged areas with storage-attenuation wetlands. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43(2): 546-556.
- [40] Zhang J, Ross M, Trout K, Zhou D. Calibration of the HSPF model with a new coupled FTABLE generation method. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(12): 1747-1755.
- [41] Lin Z L. Estimating water budgets and vertical leakages for karst lakes in north-central Florida (United States) via hydrological modeling. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2011, 47(2): 287-302.
- [42] Duan Z Y. A HSPF model sensitivity study: impacts of watershed topographic characteristics on hydrological and water quality modeling//*TMDL 2010: Watershed Management to Improve Water Quality Proceedings*. Baltimore, MD: ASABE, 2010.
- [43] Amatya D M, Skaggs R W, Gregory J D. Evaluation of a watershed scale forest hydrologic model. *Agricultural Water Management*, 1997, 32(3): 239-258.
- [44] Tian S Y, Youssef M A, Skaggs R W, Amatya D M, Chescheir G M. DRAINMOD-FOREST: Integrated modeling of hydrology, soil carbon and nitrogen dynamics, and plant growth for drained forests. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(3): 764-782.
- [45] Konyha K D, Skaggs R W. A coupled, field hydrology; open channel flow model; theory. *Transactions of the ASAE*, 1992, 35(5): 1431-1440.
- [46] Chescheir G M, Amatya D M, Skaggs R W. Modeling the hydrology of a natural forested wetlands//*Proceedings of 1994 American Society of Agricultural Engineers Annual International Meeting*, ASAE Paper no. 942597. St. Joseph, Michigan: ASABE. 1994.
- [47] Amoah J K O, Amatya D M, Nnaji S. Quantifying watershed surface depression storage; determination and application in a hydrologic model. *Hydrological Processes*, 2013, 27(17): 2401-2413.
- [48] Beven K J, Kirkby M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43-69.
- [49] Lang M, McCarty G, Oesterling R, Yeo I Y. Topographic metrics for improved mapping of forested wetlands. *Wetlands*, 2013, 33(1): 141-155.