

GIS 技术在农业面源污染研究中的应用

黄 瑜, 刘佩诗, 甘曼琴, Nebiyou Legesse, 王慧慧, 甘晓玉, 郭 龙, 马友华*

(安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036)

摘 要: 地理信息系统 (GIS) 技术具有分析速度快、智能化、可视化和信息化的优点, 利用 GIS 技术研究农业面源污染问题已经成为近年来研究农业面源污染的一大趋势。本文阐述了基于 GIS 在农业面源污染研究中的主要应用技术, 包括农业面源数据处理与管理、时空分布与空间差异性、GIS 信息系统开发、大数据可视化、模型模拟、污染风险评估及预警预测等, 并提出了 GIS 技术在农业面源污染控制和治理应用方面的发展趋势和研究方向。

关键词: 农业面源污染; GIS (地理信息系统); 大数据可视化; 模型; 空间分布与空间差异性; 污染风险评估及预警预测

近年来, 随着我国农业发展水平的不断提高, 农田中化肥、农药的过量使用, 农作物废弃秸秆、禽畜粪便、水产养殖、农膜残留及农村居民生活污水等废弃物的处置不当, 使得农业农村环境尤其是水环境受到严重污染, 在危害动植物和人类健康的同时, 也制约了我国农业的可持续发展^[1-6], 同时也是可能引发农业面源污染的主要原因。

农业面源污染是指在发生自然降雨或人类农业生产生活的过程中造成的土壤扰动, 使得农田中的土壤颗粒、氮磷钾等营养元素、农药及其它的有机、无机污染物, 在农田人工排水、农田地表径流以及地下水渗漏等的作用下, 大量进入水体, 造成水体营养元素超标, 富营养化等水体污染^[3], 进而对海洋生态、内陆水产造成严重影响, 水体中的毒素还通过水产食物链危及人体健康。同时还可能导致疾病的发生和传播以及生态失衡^[4]。农业生产活动产生的面源污染引起的环境污染负荷被称为农业面源污染负荷, 农业面源污染的产生受很多因素的影响, 比如地形条件、降雨量大小、土壤结构和成分、土地利用等。农业面源污染已成为影响我国水环境的主要污染源之一。农业面源污染具有发生面积的广域性、分散性, 发生机时的滞后性、潜伏性, 发生机理过程的复杂性, 污染排放的随机性、

间歇性、时空易变性等不确定性特点, 这些特点使得其在防控治理及预警预测方面都比较困难^[5-7]。

运用现代信息技术及时、精准、高效获取处理各类信息, 开发运用现代农业面源污染管理、规划、决策、咨询为一体的信息系统, 成为环境污染治理的一个重要方面^[6]。利用地理信息系统 (GIS) 技术研究农业面源污染问题已经成为近年来农业面源污染研究的一大趋势^[8-9], 由于 GIS 具有适应性强、更新快、交互方便等特点, 能较直观地表明与空间地理信息有关的农业点源、面源污染信息。鉴于此, 为解决日益突出的农业面源污染这一焦点性问题, 进一步提高我国农业环境保护和可持续发展的能力, 本文总结了近年来国内外基于 GIS 技术的农业面源污染应用, 为农业面源污染管理、规划和决策提供相关参考。

1 GIS 与农业面源污染数据管理和空间分析

1.1 农业面源数据处理与管理

数据是信息系统的基础, GIS 拥有强大的数据管理功能, 可以高效综合组织管理海量数据, 并对其收集、整理、利用、分析、咨询、提取等。农业面源污染数据来源获取的精准、即时、有效是建立 GIS 数据库的第一步, 其次在保证其完整和准确的情况下, 对资料数据进行处理与整合, 确保有关数据信息的互通共享, 建立适合用户需求的农业面源污染 GIS 数据库^[10]。

基于 GIS 创建的农业面源污染资料数据库主要包括空间数据库和属性数据库两大部分, 其中空间数据库包括统计年鉴、空间地理位置信息、行政区划

收稿日期: 2019-10-15; 录用日期: 2020-01-29

基金项目: 国家重点研发计划项目“水稻主产区氮磷流失综合防控技术与产品研发”(2016YFD0800503)。

作者简介: 黄瑜 (1994-), 女, 重庆云阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境生态相关方面的研究。E-mail: 703888009@qq.com。

通讯作者: 马友华, E-mail: yhma@ahau.edu.cn。

分、农户基本资料、化肥农药用量、地形、DEM、水系河网、土壤类型、土地利用类型、植被覆盖、遥感影像等；属性数据库包括土壤属性、气象、水文、水土保持、农业管理资料等。通过对已收集的数据资料进行批量计算和预处理，对其进行分类编码，存储和管理数据空间拓扑关系建立农业面源污染 GIS 资料数据库^[11]。GIS 还可以系统整合管理相关的农业面源污染文本数据，动态存储，实时更新，同时提供查询与智能故障提示，自动删除系统误差与偶然误差，筛选有效数据。

郭映等^[12]运用 GIS 软件建立小流域的农业面源污染信息数据库，并详细介绍了空间数据库和属性数据库的关系。黄金良等^[13]运用 GIS 软件和 ArcView 3.2 建立五川小流域的农业面源污染信息数据库和流域数字高程模型，为五川流域农业非点源污染模拟研究提供了基础数据平台。

1.2 空间分析

GIS 具备强大的空间分析功能，动态分析和确定各参数的空间分布及空间相关性，广泛应用于农业面源污染基础数据的获取、属性数据和栅格数据的数值计算、空间信息的分析等方面，从而实现为农业面源污染评价、管理和决策服务^[14]。帅红等^[15]在遥感影像土地利用解译图的基础上，运用 GIS 的空间分析以及图像叠加功能，生成南海区土地利用图。黄金良等^[16]为构建九龙江流域农业面源污染的分布式模型，通过 GIS 的栅格数据空间分析功能，比对出农业面源污染的关键性源区。

GIS 的空间分析功能还能直观地解析出区域内农业面源污染排放的时空动态变化情况，有针对性地为污染负荷的时空分异性提供研究依据^[17]。韩书成等^[18]和叶延琼等^[19]通过把各自研究区的农业面源污染情况分级划分，绘制成空间分布图，从而对污染情况的空间分异性特征进行剖析。GIS 在空间数据的插值中有着重要作用，胡远安等^[20]利用 GIS 进行空间插值，划分子流域及信息提取，对农业面源污染模型的模拟结果进行运算分析。

2 GIS 与农业面源污染防控信息系统和可视化技术

2.1 基于 GIS 的农业面源污染防控信息系统开发

借助 GIS 可实时对采集的农业面源污染数据进行存储、处理、显示、分析，建起环境监测信息系统，为环境决策提供辅助^[21-22]。GIS 技术的引

入，使得农业环境监测信息系统向综合集成、数据获取与应用实时性方向发展^[23]。模型虽然可以较好地模拟污染过程，但缺乏一个良好的交互式用户界面来发布、管理和分析污染状况，使其信息及时化，传播迅速化，更好满足用户的定制化需求^[24]。施加春等^[10]通过研究杭嘉湖平原的农业面源污染成因及各种污染负荷状况，建立了一个基于 WebGIS (ArcIMS、ArcSDE) 的农业面源污染信息系统 (ANPSPIS)，主要实现①用于发布农业面源污染的相关资料、信息、地图及提供查询检索服务；②提供农业面源污染现状与分布情况；③建立农业面源污染决策咨询系统，并提出相应防控对策与解决方案。史志华等^[25]结合遥感与 GIS，研究设计出汉江中下游农业面源污染动态监测信息系统，为实现动态监测、BMP 的选择、区域农业面源污染综合治理规划，以及地方政府相关部门决策提供依据。

2.2 GIS 中的大数据可视化技术

大数据可视化可以弥补数据展示方式在某种程度上的不足，将庞大而复杂的数据集中的部分通过图形图像方式表示，促进对事物的观察，并利用数据统计和开发工具发掘其中未知信息^[26-31]。大数据可视化处理技术主要包括数据建模、映射技术、人机交互技术、数据管理与操纵技术、实时动态处理技术、系统实现技术等^[32-34]。GIS 在可视化方面有大量的工具可供选用，选取哪一种工具合适，取决于数据以及可视化数据的目的^[35-36]。

在应用 GIS 的可视化技术来研究农业面源污染的过程中，将卫星定位技术与农田信息采集技术相结合，实现定点采集和状态信息分析，生成农田状态分布图^[37-39]；通过 GIS 在已知的行政区划上制作水域分布图和土地利用现状图，朱亮等^[40]以溧水区方便水库为例，在子流域划分、土地利用方式调查和点面源污染调查的基础上，运用 GIS 模拟流域内污染排放量分布状况，根据不同土地利用类型污染排放系数，生成水库保护区污染物年排放量分布图；周理等^[41]利用 GIS 的空间分析技术，将统计数据导入研究区的栅格数据属性表中，得到总超标污染负荷比，即濂溪河流域泸县境内农村污染源空间分布图。

3 GIS 与农业面源污染模型

3.1 GIS 与农业面源污染模型的集成

农业面源污染产生的动态性、复杂性以及发生

地区与时间的随机性使得很难对其进行有效地防治和规划决策^[42-43]。应用相关数学模型对农业面源污染行为进行估算和模拟,预测有关政策措施对农业面源污染产生的影响,现已成为研究农业面源污染的重要手段^[44-45]。

随着农业面源污染问题越来越严重,数据量日益增大,需要模拟的过程越来越复杂,仅靠模型难以分析污染的时空分布等问题。GIS技术,作为一种新型计算机空间数据库管理系统,将二者集成到一起后,既可利用模型定量模拟污染发生的连续行为过程,估计有关规划决策、措施对农业面源污染的影响,又可利用GIS的数据管理、空间分析、可视化等功能对更好地进行复杂计算和管理提供了新的途径^[46-48]。GIS技术与农业面源污染模型的集成不仅在模型的不同模块之间方便地完成数据交换、信息共享与反馈,还将模拟结果以生动形象的图形方式呈现给技术人员,以这些信息为基础完成相关流域水质方面的多情景预测、判断和分析^[9]。

将GIS技术与各类农业面源污染模型相结合,一直是国内外面源研究的热点。国内外学者开发了多种估算农业面源污染负荷的评价模型,并对不同区域进行了污染负荷的模拟和评估。从20世纪70年代开始涌现大量农业面源模型,常用的有农业面源污染模型(AGNPS)、流量模型(ANSWERS、SWACROP、ROB)、以地形为基础的水文模型(TOPMODEL)等^[49-51]。迄今为止国外开发的农业面源污染模型较多,如AGNPS、SWAT、ANSWERS、AnnAGNPS、HSPF、ARM、CREAMS-GLEAMS等,不同的模型有各自的优缺点,适用于不同的时间尺度和空间尺度^[52]。

3.2 两种主要的GIS农业面源污染模型

3.2.1 AnnAGNPS模型

AnnAGNPS(Annualized Agricultural Non-Point Source Pollutant Loading Model)模型来源于AGNPS,由美国农业部的农业研究(USDA-ARS)与自然资源保护局(NRCS)于1998年共同研发的一个高级流域评价工具^[53],它是针对流域农业管理措施的影响而设计开发的基于流域尺度连续事件的分布式农业面源污染模型。这是一个GIS辅助的计算机程序来开发地形跟踪分室单元(Cell),其中包含所有所需的水文和水力参数,可从现成的DEM水系坡度等数据中计算出来,包括与AnnAGNPS分室相关联的管理、土壤和气候资料的程序。AnnAGNPS

具有复杂的程序体系,每个子程序的输入文件也有繁杂的内容和格式要求,另外还要求广泛的输入数据。利用GIS这一工具,可以大大简化模型所需输入数据的产生,管理各种不同来源的空间数据和属性数据,并进行空间分析和可视化输出^[54]。GIS的其他功能还为AnnAGNPS模型所需的沟道(Reach)输入信息提供了接口,用于描述沟道口的位置和输入每个沟道的相关信息^[55]。

AnnAGNPS模型不仅可以了解流域整体的侵蚀产沙和污染物负荷情况,分析流域内任一分室单元的径流、侵蚀产沙和污染物负荷分布,而且可以评价流域内各种农业管理措施(如作物耕作系统、施肥、农药、灌溉、点源污染负荷和养殖场管理等)对流域水文和水质的影响,从而有助于制定多个最佳管理措施(BMPs),进而对BMPs进行风险评估,并对其花费进行效益分析^[56-57]。模型运算主要分为水文、侵蚀和泥沙输移、化学物质(养分和农药)3个过程的迁移运算,可在分室单元和河道模拟这3个过程产生的量,并处理来自养殖场、沟蚀、灌溉和点源的量。娄永才等^[58]和涂宏志等^[59]均采用了AnnAGNPS模型分布对黄土丘陵沟壑区岔口小流域和秦岭北麓灞河流域下流子流域的氮磷流失负荷进行了定量计算和模拟。

3.2.2 SWAT模型

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业部(USDA)开发的适用于较大流域尺度的面源污染负荷计算模型,同样也是针对长时段的分分布式流域水文物理模型^[60],能够利用GIS与RS提供的空间数据信息,模拟地表水和地下水的水量与水质状况,预测一定时期内不同土壤类型、土地利用方式及田间管理措施条件下较大较复杂流域的水文、泥沙和农业化学物质的产出,实现对不同地理尺度下农业面源污染物输出特征的分析,并逐步展开气候变化带来的农业面源污染输出效应的研究^[61]。

SWAT模型已经成为较为成熟的流域农业面源污染模型,特别是GIS和SWAT耦合集成的模型,在GIS界面中,生成子流域地图,方便用户查看子流域之间的空间关系。主要步骤有:(1)从用户指定的GIS覆盖范围生成特定的参数;(2)创建SWAT输入数据文件;(3)建立农业经营情景;(4)控制和校准SWAT模拟情况;(5)提取和组织SWAT模型输出的数据用于制图与显示。成分组件

包括:天气、地表径流量、返回流量、渗透量、蒸发蒸腾量、传输损耗、池塘和水库存储量、作物生长和灌溉、地下水径流量、河流路径、养分和农药负荷及水分转移等^[62]。

翟玥等^[63]通过建立 SWAT 模型,以云南洱海流域总氮污染为例来描述农业生产活动与污染入湖量之间的相关性,并使用验证后的 SWAT 模型模拟计算不同空间单元与不同农业生产活动对入湖氮的污染贡献系数,定量分析流域内的污染源结构,识别研究区重点农业污染源和农业污染村镇。李爽等^[64]利用 SWAT 模型模拟了南四湖典型小流域氮磷污染情况,发现该模型在地形起伏较大的地区能获得较高的模拟精度。胡文慧等^[65]基于 SWAT 分布式水文模型研究表明汾河灌区在 7 ~ 9 月汛期会产生至少 50% 氮和 70% 磷的流失,严重威胁灌区的生态环境。吴春蕾等^[66]建立了基于 GIS 的 SWAT 模型,讨论了 SWAT 在巢湖流域农业面源污染研究中的应用发展前景与方法。乔卫芳等^[67]基于 GIS 和流域 DEM,利用 SWAT 模型构建了丹江口水库流域农业面源污染基础信息库,在确定模型适用性的基础上分析了流域农业面源污染负荷的时空分布特征,模拟计算出流域内主要土地利用类型的单位面积农业面源污染负荷量。

3.2.3 GIS 在 AnnAGNPS 模型和 SWAT 模型中的异同

AnnAGNPS 和 SWAT 模型均为每日时间步长、流域尺度、污染物负荷模型,用以模拟农业流域的长期径流、泥沙、养分和污染物输移,两种模型都用到了 GIS。SWAT 模型使用水文响应单元 (HRUs),而 AnnAGNPS 则使用不同大小的单元;污染物从这些单元流向相关河段,该模型要么将污染物沉积在河道系统中,要么将它们运输出流域^[68]。在水文方面:AnnAGNPS 是长期的、每日或次日的陆地面积 (Cells)、河段和蓄水池;SWAT 是以气候、水文单元、池塘、地下水和主河道为基础的长期、每日或次日的阶梯式流域。在 GIS 中输入的气象数据方面:AnnAGNPS 输入降雨量、最高和最低温度、露点温度、天空覆盖、风速等;SWAT 有降水、最高和最低温度、相对湿度、风速和太阳辐射等^[69]。

4 GIS 在农业面源污染评价和预测预警中的应用

4.1 风险评估

GIS 在区域农业面源污染环境质量现状评价工

作中,可将地理信息与大气、土壤、水、人类活动等相关联的环境要素数据结合在一起,集成管理与区域密切相关的环境数据,利用空间分析模块,对整个区域的农业面源污染环境质量现状进行客观、全面的评价,以反映出区域中受污染程度及空间分布状况,因而 GIS 也是综合分析评价农业环境的有力工具^[70-72]。

陈梅^[73]针对长江流域丘陵地带的水体特征,建立小流域农业面源污染空间负荷估算模型和基于 GIS 的空间多指标农业面源污染风险评估模型,定量研究污染负荷的空间分布以及潜在的农业面源污染风险,并以此为基础划分负荷和风险等级,确定关键污染源区,构建分级分区技术监管体系。李飞等^[74]从环境压力水平与强度方面选取多项农业污染风险评价指标,综合评估东部沿海地区化肥、农药、农膜污染及畜禽养殖污染的风险,并运用因子分析和聚类分析法,将其划分为高、中、低三类农业污染风险区。

4.2 预警预测

从国内外发展现状看,利用 GIS 技术可以对重大自然灾害、农业灾害和环境应急预警进行综合测评,为政府和有关机构提供及时有效、精确可靠的决策信息,为防灾、减灾、救灾等提供更充分的科学依据,有力保证农业生产和农村经济稳定发展。建立区域环境面源污染预警系统,能够对污染源的地理位置及其属性、事故敏感区域位置及其属性进行有效管理,提供农业面源污染河流污染扩散的模拟过程和应急方案^[75]。对于农业环境灾害发生的区域,可通过 GIS 空间信息计算出的大致受灾面积,估算经济损失^[76-77]。根据 GIS 空间特性,对区域内历史数据的演变分析及灾害发生的基本规律、时空分布、危害程度等进行综合评价和模拟,预测灾害发展趋势,为防灾、减灾提供相应对策^[78-79]。

丁恩俊^[80]以三峡库区王家沟小流域为例,应用地统计学结合 GIS 的方法,在土壤养分空间变异特征的基础上,绘制出土壤养分空间分布图,为合理布局农业生产、科学施肥、改土培肥、综合治理水土流失和土地退化等问题提供依据。也有学者在密歇根州农业流域为例的土壤侵蚀与氮磷流失情况的研究中引入了 GIS 技术,并由此提出了农业最佳管理措施^[81-82]。

5 展望

随着对农业面源污染防控要求的不断提高,

GIS 与农业面源污染相结合的应用研究将更加广泛。应用 GIS 辨识出农业面源污染的主要来源和迁移途径及其对水体的影响, 并对农业面源污染预测预警, 为流域农业面源污染规划和管理提供科学的决策依据。未来利用 GIS 在农业面源污染研究上可重点开展以下工作:

(1) 加强 GIS 可视化技术与分析推理预测技术的集成。实现农业面源防控数据实时图形可视化、场景化以及实时交互, 让使用者更加快捷、方便地进行数据的理解和空间知识的呈现, 以达到快速进行有效决策和管理的目的。

(2) 利用 GIS 提升农业面源污染大数据筛选能力, 打破数据仓库的孤立状态, 实现行业内数据共享, 实现政府决策者所需要的数据普遍可用性。

(3) 深化农业面源污染模型与 GIS 的集成。提高目标流域的模拟精度, 加强农业面源污染模型在中国农业领域的适用性研究。

参考文献:

- [1] 陈勇, 冯永忠, 杨改河. 农业非点源污染研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2010, 38 (8): 173-181.
- [2] 文传浩, 张丹, 铁燕. 农业面源污染环境效应及其对新农村建设耦合影响分析 [J]. 贵州社会科学, 2008 (4): 91-96.
- [3] 任军, 边秀芝, 郭金瑞, 等. 我国农业面源污染的现状与对策 I. 农业面源污染的现状与成因 [J]. 吉林农业科学, 2010, 35 (2): 48-52.
- [4] 王静, 郭熙盛, 王青霄. 秸秆覆盖与平衡施肥对巢湖流域农田磷素流失的影响研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2009 (5): 53-56.
- [5] 饶静, 许翔宇, 纪晓婷. 我国农业面源污染现状、发生机制和对策研究 [J]. 农业经济问题, 2011, 32 (8): 81-87.
- [6] 闵继胜, 孔祥智. 我国农业面源污染问题的研究进展 [J]. 华中农业大学学报 (社会科学版), 2016 (2): 59-66, 136.
- [7] 雷秋良, 张继宗, 岳勇, 等. GIS 技术在非点源污染研究中的应用进展 [J]. 土壤通报, 2008 (3): 687-693.
- [8] 牛俊玲, 郑宾国. GIS 技术在农业非点源污染中的应用研究 [J]. 农业环境与发展, 2008 (5): 112-114.
- [9] 毛鹏, 周美春, 胡国仲. GIS 在农业面源污染研究中的应用 [J]. 资源与环境科学, 2013 (21): 246-250.
- [10] 施加春, 徐建民, 史舟, 等. 基于 WebGIS 技术的农业面源污染信息系统的开发及应用 [J]. 浙江大学学报, 2003, 29 (5): 2-3.
- [11] 李旭晖, 刘洋. 时空数据建模方法研究综述 [J]. 数据分析与知识发现, 2019, 3 (3): 1-13.
- [12] 郭映, 李星, 邱玉宝. GIS 在非点源污染数据库建设中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2005 (5): 391-393.
- [13] 黄金良, 洪华生, 张璐平, 等. GIS 在九龙江流域农业非点源污染信息数据库建立中的应用——以五川小流域为例 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2004 (1): 93-97.
- [14] 马强, 马红娟, 唐华, 等. 农业非点源污染与防控研究进展 [J]. 现代农业科技, 2015 (1): 200-204.
- [15] 帅红. 佛山市南海区土地利用结构对非点源污染影响研究 [J]. 广州环境科学, 2007 (3): 35-38.
- [16] 黄金良, 洪华生, 张璐平. 基于 GIS 和模型的流域非点源污染控制区划 [J]. 环境科学研究, 2006 (4): 119-124.
- [17] 管飞, 马友华, 张东红, 等. 农业面源污染负荷空间分布及风险评价研究进展 [J]. 中国农学通报, 2017, 33 (30): 61-66.
- [18] 韩书成, 龚亚男, 汤新明. 基于 GIS 的湛江市农业面源污染的时空分析 [J]. 国土资源科技管理, 2018, 35 (6): 1-16.
- [19] 叶延琼, 章家恩, 李逸勉, 等. 基于 GIS 的广东省农业面源污染的时空分异研究 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32 (2): 369-377.
- [20] 胡远安, 程声通, 贾海峰, 等. 遥感与 GIS 辅助下的非点源模型空间参数提取 [J]. 重庆环境科学, 2003, 25 (10): 7-20.
- [21] 马春萍, 万兵, 和春燕, 等. 遥感与 GIS 结合在生态环境评价中的应用 [J]. 中国西部科技, 2012, 11 (1): 29-30.
- [22] 夏昊, 王云鹏. 面源模型与 GIS 集成应用研究综述 [J]. 环境保护, 2003 (12): 30-33.
- [23] 舒艳, 王红旗, 黄歆宇. 地理信息系统在环境保护领域的应用分析 [J]. 环境保护, 2002 (1): 30-32.
- [24] 耿润哲, 梁璇静, 殷培红, 等. 面源污染最佳管理措施多目标协同优化配置研究进展 [J]. 生态学报, 2019, 39 (8): 2667-2675.
- [25] 史志华, 张斌, 蔡崇法, 等. 汉江中下游农业面源污染动态监测信息系统的建立与初步应用 [J]. 遥感学报, 2002 (5): 382-386.
- [26] 张锋军. 大数据技术研究综述 [J]. 通信技术, 2014, 47 (11): 1240-1248.
- [27] 贺群, 杨明川. 基于 WebGIS 的大数据可视化研究与优化 I [J]. 电信技术, 2015 (6): 37-40.
- [28] 沈汉威, 张小龙, 陈为, 等. 可视化及可视分析专题前言 [J]. 软件学报, 2016, 27 (5): 1059-1060.
- [29] Fekete J D. Advanced interaction for Information Visualization [C]. Taipei: IEEE Pacific Visualization Symposium Pacific Vis, 2010.
- [30] Pike W A, Stasko J, Chang R, et al. The science of interaction [J]. Information Visualization, 2009, 8 (4): 263-274.
- [31] 吴加敏, 孙连英, 张德政. 空间数据可视化的研究与发展 [J]. 计算机工程与应用, 2002 (10): 85-88.
- [32] 李纲, 郑重. 信息可视化应用研究进展 [J]. 图书情报知识, 2008 (4): 36-40.
- [33] 任磊, 杜一, 马帅, 等. 大数据可视分析综述 [J]. 软件学报, 2014, 25 (9): 1909-1936.
- [34] 贾泽露, 刘耀林. 可视化空间数据挖掘研究综述 [J]. 地理空间信息, 2009, 7 (6): 10-15.

- [35] 梁辰, 徐健. 社会网络可视化的技术方法与工具研究 [J]. 现代图书情报技术, 2012 (5): 7-15.
- [36] 何山, 孙媛媛, 沈掌泉, 等. 大数据时代精准施肥模式实现路径及其技术和方法研究展望 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (6): 1514-1524.
- [37] 杜克明, 褚金翔, 孙忠富, 等. WebGIS 在农业环境物联网监测系统中的应用 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (4): 171-178.
- [38] 邹云娣, 汤立, 谢伟. 网络地理信息系统对农业面源监控的研究 [J]. 农机化研究, 2008 (6): 218-221.
- [39] 李宏伟, 张世全, 孙庆珍. 基于 GIS 的点源污染扩散模拟可视化研究 [J]. 环境科学与管理, 2007 (10): 175-178.
- [40] 朱亮, 刘畅, 陈琳, 等. 基于 GIS 技术的方便水库面源污染控制方案研究 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (1): 50-57.
- [41] 周理, 吴玲玲, 马亚丽, 等. 基于 GIS 技术的濂溪河流域泸县境内农村非点源污染评估 [J]. 水生态学杂志, 2014, 35 (4): 15-21.
- [42] 杨林章, 吴永红. 农业面源污染防治与水环境保护 [J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 168-176.
- [43] 郑涛, 马友华, 胡宏祥, 等. 农业面源污染生态风险评估研究进展 [J]. 环境保护与循环经济, 2016, 36 (7): 35-39.
- [44] 刘钦普. 农田氮磷面源污染环境风险研究评述 [J]. 土壤通报, 2016, 47 (6): 1506-1513.
- [45] 崔键, 马友华, 赵艳萍, 等. 农业面源污染的特性及防治对策 [J]. 中国农学通报, 2006 (1): 335-340.
- [46] 郭鸿鹏, 朱静雅, 杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展 [J]. 农业工程学报, 2008, 24 (4): 290-295.
- [47] 李丽华, 李强坤. 农业非点源污染研究进展和趋势 [J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31 (1): 13-22.
- [48] 张水龙, 庄季屏. 农业非点源污染研究现状与发展趋势 [J]. 生态学杂志, 1998 (6): 52-56.
- [49] Chen L, Liu R M, Huang Q, et al. Integrated assessment of nonpoint source pollution of a drinking water reservoir in a typical acid rain region [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2013, 10 (4): 651-664.
- [50] Nugroho S P, Boer D D, Froehlich W, et al. Application of the agricultural non-point source pollution (AGNPS) model for sediment yield and nutrient loss prediction in the Dumpul [J]. Journal of Chemical Physics, 2004, 127 (15): 154104-154109.
- [51] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning [J]. Transactions of the ASAE, 1980, 23 (4): 938-944.
- [52] Adu J T, Kumarasamy M V. Assessing non-point source pollution models: a review [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27 (5): 1913-1922.
- [53] 李家科, 李怀恩, 李亚娇. AnnAGNPS 模型研究及应用进展 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2009, 37 (2): 225-234.
- [54] 夏昊. 基于 GIS 的面源信息系统及其在流溪河下游流域和增江上游流域的初步应用 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2004.
- [55] 高银超, 鲍玉海, 唐强, 等. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区小江流域非点源污染负荷评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21 (S1): 119-126.
- [56] Karki R, Tagert M L M, Paz J O, et al. Application of AnnAGNPS to model an agricultural watershed in East-Central Mississippi for the evaluation of an on-farm water storage (OFWS) system [J]. Agricultural Water Management, 2017, 192: 103-114.
- [57] Jiang K, Li Z, Luo C, et al. The reduction effects of riparian reforestation on runoff and nutrient export based on AnnAGNPS model in a small typical watershed, China [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26 (6): 5934-5943.
- [58] 姜永才, 郭青霞. 岔口小流域 AnnAGNPS 模型参数敏感性分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34 (3): 207-215.
- [59] 涂宏志, 侯鹰, 陈卫平. 基于 AnnAGNPS 模型的苇子沟流域非点源污染模拟研究 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36 (7): 1345-1352.
- [60] 杨菁蓉, 张万昌. SWAT 模型及其在水环境非点源污染中的应用研究进展 [J]. 水土保持研究, 2009, 16 (5): 260-266.
- [61] 赖格英, 吴敦银, 钟业喜, 等. SWAT 模型的开发与应用进展 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (3): 243-251.
- [62] 王培, 马友华, 赵艳萍, 等. SWAT 模型及其在农业面源污染研究中的应用 [J]. 农业环境与发展, 2008 (5): 105-109.
- [63] 翟玥, 尚晓, 沈剑, 等. SWAT 模型在洱海流域面源污染评价中的应用 [J]. 环境科学研究, 2012, 25 (6): 666-671.
- [64] 李爽, 张祖陆, 孙媛媛. 基于 SWAT 模型的南四湖流域非点源氮磷污染模拟 [J]. 湖泊科学, 2013, 25 (2): 236-242.
- [65] 胡文慧, 李光永, 孟国霞, 等. 基于 SWAT 模型的汾河灌区非点源污染负荷评估 [J]. 水利学报, 2013, 44 (11): 1309-1316.
- [66] 吴春蕾, 马友华, 李英杰, 等. SWAT 模型在巢湖流域农业面源污染研究中应用前景与方法 [J]. 中国农学通报, 2010 (18): 324-328.
- [67] 乔卫芳, 牛海鹏, 赵同谦. 基于 SWAT 模型的丹江口水库流域农业非点源污染的时空分布特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22 (2): 219-225.
- [68] Geter W F, Theurer F D. AnnAGNPS-RUSLE sheet and rill erosion [C]// Proceedings of the First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference. Washington DC: Interagency Advisory Committee on Water Data, Subcommittee on Hydrology, 1998.
- [69] Parajuli P B, Nelson N O, Frees L D, et al. Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas [J]. Hydrol Process, 2009, 23 (5): 748-763.
- [70] 赵赏, 钟凯文, 孙彩歌. GIS 技术在农业领域的应用 [J]. 农机化研究, 2014, 36 (4): 234-237.

- [71] 毛玉娜, 叶爱中, 王雪蕾, 等. 基于 GIS-RS 的非点源污染模型研究进展 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2013, 49 (4): 407-416.
- [72] 鲁明星, 贺立源, 吴礼树, 等. 基于 GIS 的鄂州市中低产耕地评价及其改良利用 [J]. 中国土壤与肥料, 2007 (1): 22-26.
- [73] 陈梅. 农业面源污染风险评估及分级区划研究 [D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [74] 李飞, 董锁成, 李宇, 等. 中国东部沿海地区农业污染风险地域分异研究 [J]. 资源科学, 2014, 36 (4): 801-808.
- [75] 邹云娣, 汤立, 谢伟. 网络地理信息系统对农业面源监控的研究 [J]. 农机化研究, 2008 (6): 218-221.
- [76] 王翔宇, 温皓杰, 李鑫星, 等. 农业主要病害检测与预警技术研究进展分析 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (9): 266-277.
- [77] 殷江涛. 地理信息系统 (GIS) 在环境保护中的应用 [J]. 低碳世界, 2014 (9): 132-133.
- [78] León L F, Lam D C, Swayne D A, et al. Integration of a nonpoint source pollution model with a decision support system [J]. Environmental Modelling & Software, 2000, 15 (3): 249-255.
- [79] 章明奎, 李建国, 边卓平. 农业非点源污染控制的最佳管理实践 [J]. 浙江农业学报, 2005 (5): 244-250.
- [80] 丁恩俊. 三峡库区农业面源污染控制的土地利用优化途径研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [81] Cooke W H, Grala K, Wallis R C. Avian GIS models signal human risk for West Nile virus in Mississippi [J]. International Journal of Health Geographics, 2006, 5 (1): 36.
- [82] Wu S, Li J, Huang G. GIS applications to agricultural non-point-source pollution modeling: a status review [J]. Environmental Informatics Archives, 2005, 3: 202-206.

Application of GIS technology in research of agricultural non-point source pollution

HUANG Yu, LIU Pei-shi, GAN Man-qin, Nebiyu Legesse, WANG Hui-hui, GAN Xiao-yu, GUO Long, MA You-hua* (School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei Anhui 230036)

Abstract: GIS technology has quite numerous advantages which include: intelligence, quick analysis, multilayered visualization and presentation and delivery of information. In recent years, GIS technology is identified as a major tool to study agricultural non-point source pollution. Hence, GIS topics related to agricultural nonpoint source pollution are expounded in this article. These include: data processing and management, temporal and spatial heterogeneity and distribution, GIS development, data visualization, modelling and simulation, pollution risk assessment and early warning forecast etc. The article puts forward the application of GIS for control of agricultural non-point source pollution and for facilitating policy directives, and it further directs the subject's research trend.

Key words: agricultural non-point source pollution; GIS (geographic information system); big data visualization; model; spatial distribution and spatial difference; pollution risk assessment and early warning prediction