

未来发展情景选择对农业面源污染风险的影响分析

朱康文, 陈玉成, 熊海灵, 张晟, 杨志敏, 黄磊, 雷波

引用本文:

朱康文, 陈玉成, 熊海灵, 等. 未来发展情景选择对农业面源污染风险的影响分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1971–1981.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0222>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于CLUE-S的香溪河土地利用变化预测与总磷污染负荷分析

王清睿, 刘瑞民, 门聪, 郭力嘉

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 747–755 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1500>

喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应

彭宏佳, 吴起鑫, 任斐鹏, 安艳玲, 付宇文, 刘瑞禄, 吕婕梅

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 756–765 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1486>

汉江流域农业面源污染的源解析

唐肖阳, 唐德善, 鲁佳慧, 常文倩, 唐新玥

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2242–2251 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1751>

资江尾间集水区景观格局与非点源污染过程关系研究

贾玉雪, 帅红, 韩龙飞

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 833–843 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1107>

农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评估研究——以淮河流域为例

宋大平, 左强, 刘本生, 邹国元, 刘东生

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1219–1231 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1374>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

朱康文, 陈玉成, 熊海灵, 等. 未来发展情景选择对农业面源污染风险的影响分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1971–1981.

ZHU K W, CHEN Y C, XIONG H L, et al. Impact analysis of the future development scenario on risks from agricultural non-point source pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 1971–1981.



开放科学 OSID

未来发展情景选择对农业面源污染风险的影响分析

朱康文¹, 陈玉成^{1,2*}, 熊海灵³, 张晟⁴, 杨志敏^{1,2}, 黄磊^{1,2}, 雷波⁴

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 农村清洁工程重庆市工程研究中心, 重庆 400716; 3. 西南大学计算机与信息科学学院, 重庆 400716; 4. 重庆市生态环境科学研究院, 重庆 401147)

摘要:为指导区域未来发展模式选择和农业面源污染(Agricultural non-point source pollution, ANSP)典型区域(涪陵区)风险调控,综合CLUE-S、Markov、GIS、改进的输出风险模型等模型和技术的优势,在ANSP典型区域(涪陵区)以2010、2015年土地利用数据为基础,进行未来2020—2030年的自然发展(ND)和耕地保护(CP)两种情景下的ANSP输出风险演变及对输出系数调整的响应分析。研究发现:涪陵区土地利用数据模拟精度较好,Kappa系数为0.75且FoM大于0.21。涪陵区2010—2030年期间ANSP风险等级明显降低,尤其是靠近大木山、武陵山区域的镇街和子流域。风险等级降低速率减缓明显,ND情景下,清溪镇在2010、2015、2020、2025、2030年各年份Ⅶ以上等级风险比例分别为46.20%、29.69%、25.72%、22.20%、20.00%。子流域输出风险等级对于耕地输出系数(即化肥施用水平)变化具有很好的响应关系。未来的情景模拟有利于探寻区域不同发展情景下输出风险与土地利用变化之间的响应关系,有利于聚焦分析各镇街或某子流域风险变化情况。本研究路径与方法有利于区县对各镇街、子流域未来的ANSP风险进行有效防控。

关键词:农业面源污染;CLUE-S模型;GIS;输出系数

中图分类号:F301.2;X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2021)09-1971-11 **doi:**10.11654/jaes.2021-0222

Impact analysis of the future development scenario on risks from agricultural non-point source pollution

ZHU Kangwen¹, CHEN Yucheng^{1,2*}, XIONG Hailing³, ZHANG Sheng⁴, YANG Zhimin^{1,2}, HUANG Lei^{1,2}, LEI Bo⁴

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Engineering Research Center of Rural Cleaning, Chongqing 400716, China; 3. College of Computer & Information Science, Southwest University, Chongqing 400716, China; 4. Chongqing Academe of Eco-environmental Science, Chongqing 401147, China)

Abstract: The results of China's second national pollution source survey showed that agricultural non-point source pollution (ANSP) is still a main contributor to water pollution. In our analysis, we chose the Fuling District as a typical area of ANSP, based on land use data from 2010 to 2015. Our analysis integrated the advantages of CLUE-S, Markov, GIS, and an improved output risk model. This study analyzes the projected changes of ANSP risk and its response to the adjustment of output coefficients under the two scenarios of natural development (ND) and cultivated land protection (CP) from 2020 to 2030. The purpose of the study is to develop information that may help guide the selection of modes of future regional development and the establishment of policies for ANSP risk reduction. Study accuracy analysis results of the land use simulation show that the Kappa coefficient was 0.75 and the FoM exceeded 0.21, and the degree of preciseness was good. According to the modeled results, the risk of ANSP in the Fuling District decreases significantly from 2010 to 2030, especially in the towns and sub-basins near the Damu and Wuling mountains. However, the rate of risk reduction decreases over time. For

收稿日期: 2021-02-25 录用日期: 2021-05-20

作者简介: 朱康文(1990—),男,湖南张家界人,博士研究生,主要从事农业环境保护研究。E-mail: zhukangwen0927@163.com

*通信作者: 陈玉成 E-mail: cyc_sw_edu@163.com

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点研发项目(cstc2019jcsx-gksbX0103)

Project supported: The Key R&D Project of Special Fund for Technological Innovation and Application Development in Chongqing (cstc2019jcsx-gksbX0103)

example, under the ND scenario, using 5-year intervals from 2010 to 2030, the proportions of Grade VII or above risk in Qingxi Town was 46.20%, 29.69%, 25.72%, 22.20%, and 20.00%. The risk reduction in the sub-basins demonstrated a good response to the change of the output coefficient in cultivated land (i.e., the amount of fertilizer application). The simulation of the future scenario was helpful in exploring the response relationship between pollution risk and changing land use under different regional development scenarios. It also revealed the benefit of focusing on analyzing the changes of pollution risks for each of the towns or sub-basins. These results demonstrate that this method is conducive to developing strategies for the effective prevention and control of future ANSP risks in each town and sub-basin.

Keywords: agricultural non-point source pollution; CLUE-S model; GIS; output coefficient

农业面源污染 (Agricultural non-point source pollution, ANSP) 是农业生产活动引起的各种污染物在降雨、径流等驱动作用下从土壤向水体扩散, 引起受纳水体污染的过程^[1]。ANSP 的研究主要从 20 世纪 70 年代开始, 美国环保局为控制日益严重的水体环境污染, 要求各州编制非点源污染控制方案^[2]。我国在 20 世纪 80 年代才开始关注 ANSP, 但并没有采取相应的控制措施^[3]。ANSP 具有滞后性, 其污染凸显需要一个过程, 20 世纪 90 年代开始我国农村生态环境问题开始显现。当前国内外 ANSP 形势依然严峻, 中国第一次、第二次全国污染源普查公报显示, 农业源总氮 (TN)、总磷 (TP) 分别占水体污染排放总量的比例由 2007 年的 57.2%、67.3% 变为 2017 年的 46.5%、67.2%。涪陵区 2018 年统计年鉴数据显示, 化肥、农药施用强度分别为 221.19、7.41 kg·hm⁻²。美国的调查和研究指出, 15% 的排水良好的农业区其地下水的硝态氮浓度超过了饮用水质标准^[4], 这源于土壤中施用了高含量的氮。欧洲因农业活动输入到北海河口的 TN、TP 分别占入海通量的 60% 和 25%^[5]。因此为解决 ANSP 问题各国学者均开展了大量研究, 随着农学与地理学的深入融合, ANSP 研究不断深入, 如 LULL 等^[6]、TAHMASEBI 等^[7]、CHENG 等^[8]、龙天渝等^[9]将地理学领域方法融入 ANSP 研究中, 这有利于准确识别污染物的输移过程、空间变化、风险趋势等情况。地理学融入 ANSP 分析侧重于土地利用和景观格局对 ANSP 的影响研究及地理学分析方法的应用, 主要包括 ANSP 随土地利用变化的演变情况^[1], ANSP 对景观格局优化调整的响应分析^[10], 地理学方法对 ANSP 空间演变^[9]、负荷强度^[8]、输移路径^[11]等方面的研究。

综合已有研究和当前 ANSP 问题在区县层面防控的实际情况发现: 当前区域现状是土地利用与 ANSP 风险之间的关系研究较多, 但对于未来土地利用变化对 ANSP 风险演变影响的研究较少, 掌握未来 ANSP 风险演变有利于提升区县层面的风险防控效果; 同时 ANSP 受当地经济发展模式选择影响较大,

如自然发展和耕地保护两种模式下地类结构、肥药施用水平均存在一定差异, 因此探讨不同模式下的 ANSP 演变情况也是区县层面需要开展的研究; 目前已有研究中较为成熟的思路是结合土地利用数据与输出系数法进行区域 ANSP 演变分析^[1], 结果展示方面以子流域为统计单元的效果最佳^[9], 但是输出系数法在测算时较少考虑子流域内的自然环境差异, 导致结果难以反映子流域内部空间差异情况。因此通过优化改进模型达到区分子流域内部空间异质性的目的也是目前研究需要解决的问题。

未来土地利用数据模拟方法主要包括 CA-Markov 模型^[12]、神经网络算法^[13]、系统动力学方法^[14]、CLUE-S 模型^[15-16]等, 其中以 CLUE-S 和 CA-Markov 模型应用较多。因此为丰富区县尺度 ANSP 风险演变研究工作, 本研究利用 CLUE-S^[17-18]和 Markov^[16]模型在土地利用情景模拟方面的优势, 以具有生态地位高、生态风险大、农业经济比重高、ANSP 风险大等特点的三峡库区典型区县——涪陵区为研究对象, 进行自然发展 (ND) 和耕地保护 (CP) 两种发展模式下 2020—2030 年土地利用覆盖变化模拟, 并融入距水域距离、坡长坡度因子等对输出风险模型进行改进, 以分析区域内各子流域 ANSP 风险演变趋势, 并进行输出风险响应分析。研究路径与方法可很好地支撑区域的 ANSP 未来发展模式选择与风险调控等决策工作, 改进后的输出风险模型可较好地地区分子流域内部空间异质性, 对区域 ANSP 风险防控具有重要的数据支撑和借鉴意义。

1 研究方法

1.1 研究区域概况与数据来源

涪陵区位于中国重庆市中部, 东经 106°56′~107°43′, 北纬 29°21′~30°01′。长江和乌江在涪陵城区交汇, 区域内汇入长江的一级支流有 35 条, 其中流域面积大于 100 km² 的河流有乌江、梨香溪、小溪、渠溪河等 12 条, 可划分 470 个子流域 (图 1, 子流域划分在

ArcGIS软件中进行,详细方法见文献[19]),该区域在保障长江中下游和三峡库区生态安全方面具有重要地位^[20]。此外涪陵区生态环境较好,包括大木山自然保护区、江东桫欏自然保护区、武陵山森林公园、乌江森林公园等自然保护地。涪陵区经济发展水平较高,2018年全区生产总值为1 076.13亿元,第一、二、三产业比例为6.1:57.0:36.9。同时涪陵区农业较为发达,2018年涪陵区农林牧渔业总产值为96.67亿元,全年粮食播种面积9.18万hm²,全年粮食总产量44.03万t。

以上表明涪陵区具有生态地位高、农业占比高和ANSP风险高等特点,其区域内的ANSP问题备受学者关注,LIU等^[21]、梁增芳等^[22]、WANG等^[11]在涪陵区部分小流域已开展了ANSP相关研究工作。因此涪陵区的ANSP时空演变及未来发展趋势研究具有重要的现实意义。

1.1.1 土地利用现状分析

涪陵区2010—2015年的土地利用数据反映出其地类比例变化较大,2010年和2015年耕地、林地、草地、水域、建设用地、其他用地面积比例分别为52.85%、41.94%、0.14%、3.13%、1.91%、0.03%和36.96%、53.13%、1.20%、3.50%、5.21%、0(图2)。采用转移矩阵对各地类转化情况分析发现,耕地、林地转出较多。耕地主要存在林地转入,比例为7.77%;林地主要存在耕地转入,比例为29.21%;草地主要存在耕地、林地转入,比例分别为28.76%、65.62%;水域主要存在耕地、林地转入,比例分别为13.05%、7.31%;

建设用地主要存在耕地、林地转入,比例分别为52.08%、13.24%。总体上林地和水域空间格局变化较小,建设用地外扩现象明显,水田、旱地、建设用地主要分布在长江、乌江沿岸,林地主要分布在中部黄草山和南部大木山、武陵山区域。

1.1.2 数据来源

数据类型主要分为面板数据、遥感数据和统计数据,遥感数据包括2010年和2015年的土地利用数据、土壤类型及质地数据、数字高程模型(DEM)地形数据和坡度数据。土地利用数据来源于中国生态环境遥感评估项目^[23],当前此数据集仅发布到2015年的数据。DEM数据来源于资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>),坡度数据利用GIS测算获取,所有数据在GIS软件中进行重采样后分辨率为30 m。

1.2 技术路线与研究方法

研究采用CLUE-S和Markov模型分ND、CP两种发展模式进行未来土地利用变化模拟,采用Kappa系数进行初步精度分析^[24]。同时根据孙毅中等^[25]采用的Pontius,通过统计模拟结果和实际数据之间差异区和共性区构建的FoM指标再次进行空间模拟精度验证,一般认为FoM大于0.21时具有较高精度。在此基础上开展子流域划定,结合改进的输出风险模型进行ANSP输出风险演化分析,并分析ANSP风险对输出系数变化的响应情况(图3)。

1.2.1 基于CLUE-S和Markov模型的土地利用情景预测

研究采用CLUE-S和Markov模型分ND、CP两种

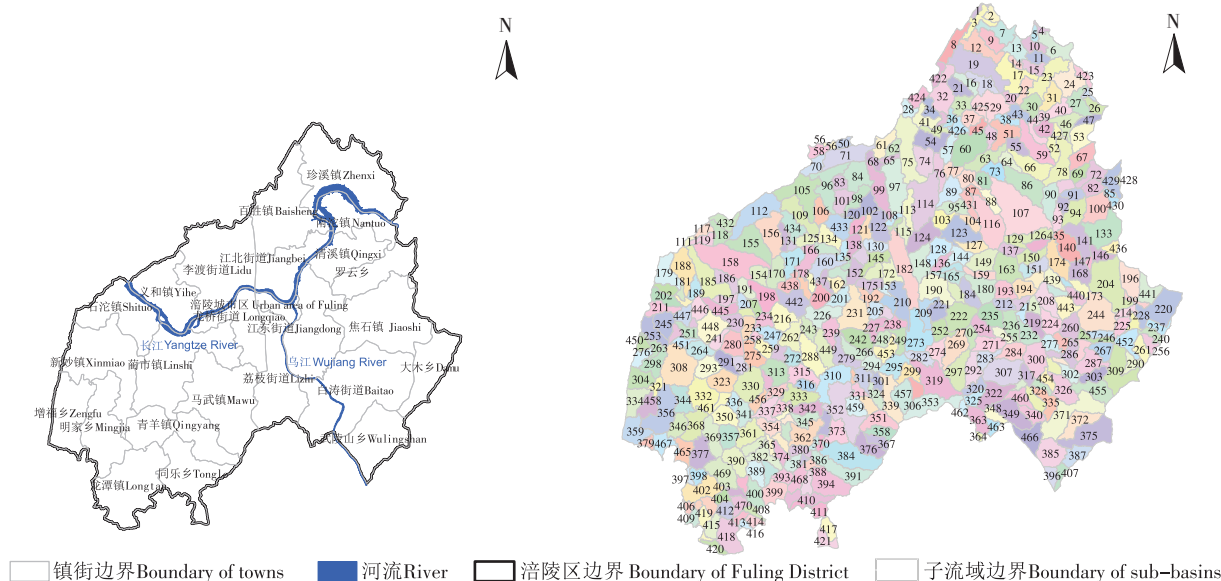


图1 涪陵区位和子流域分布图

Figure 1 Distribution map of the location and sub-basins in Fuling District

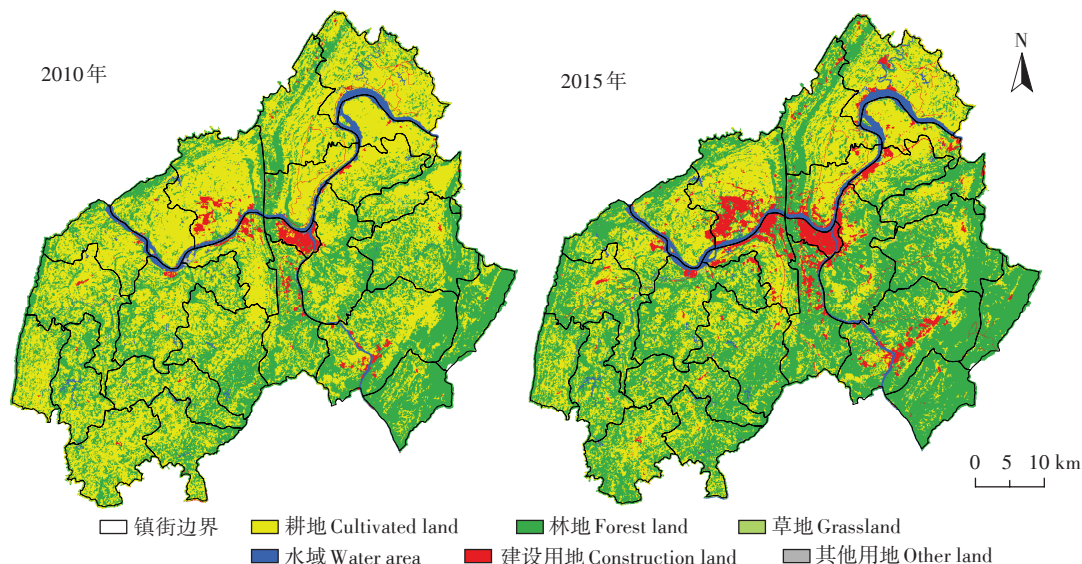


图2 涪陵区2010年和2015年土地利用类型分布图

Figure 2 Distribution map of land use types in Fuling District in 2010 and 2015

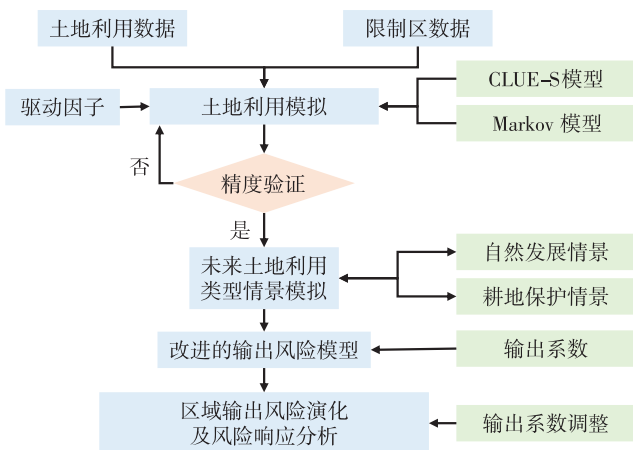


图3 技术路线图

Figure 3 Technology roadmap

发展模式进行未来土地利用变化模拟。以2010年为基础,模拟2015年土地利用数据,并与2015年土地利用现状数据进行对比以分析模型在研究区的模拟精度,开展ND、CP两种发展情景下2020、2025、2030年研究区的土地利用模拟。

(1) CLUE-S模型及输入要素介绍

CLUE-S模型是Peter-verburg团队在CLUE模型的基础上改进的土地利用变化模拟模型^[26-27],CLUE-S模型主要由需求模块和空间分配模块构成^[27-28]。需求模块用于计算研究区域内各土地利用类型在目标年的需求量,需要通过外部模型或方法进行计算,本研究将Markov模型引入用来计算各地类需求量^[12]。空间分配模块输入要素主要包括4个方面:土地需求

文件、各土地利用类型的转换规则及转换弹性系数、各土地利用类型与各驱动因子之间的关系、限制区文件,具体模拟过程详见文献[17]。

(2) Markov模型测算土地利用需求

土地利用需求是指计算模拟期间内每年各土地利用类型的需求量。Markov模型是状态离散和时间离散的动力学模型,是主要针对数量上的预测^[29]。Markov模型由于具有长期预测的能力而被广泛应用,例如HULST^[30]、LIPPE等^[31]、刘春艳等^[32]曾将Markov模型应用在解决植被生态或生物多样性功能变化预测方面等,表明Markov模型在未来土地利用类型预测方面具有较好的效果。本研究在GIS、IDRISI(Markov模块)软件的支持下,通过2010年和2015年土地覆盖数据,结合Markov预测的需求量以及涪陵区未来土地利用规划、城乡发展规划等,得到CLUE-S模型需要的2020、2025、2030年ND情景模式下土地利用类型面积需求文件。CP情景在ND情景基础上将耕地、草地、其他用地降速分别调减10%,林地、水域、建设用地增速分别调减10%以平衡面积变化。

(3) 转换系数

根据不同土地利用类型的历史变化情况和未来实际土地的规划情况设置各土地利用类型的稳定程度,由模型参数ELAS(转换系数)^[33]定义:①一般情况下,不会转换为其他土地利用类型的ELAS设为1;②极易变化的土地利用类型的ELAS设为0;③ $0 < ELAS < 1$ 时,其值越大表示该地类越稳定。根据已有研究成果、区域实际情况、模拟调试结果进行ELAS

的设置^[16,34-35],耕地、林地、草地、水域、建设用地、其他用地的ELAS分别为0.64、0.90、0.95、0.90、0.98、0.90。

(4)土地利用类型与驱动因子之间的关系方程构建

二项 Logistic 回归是目前最常用的二项选择模型,其因变量只有0和1两个值,选取某一土地利用类型作为因变量,驱动因子作为自变量^[28],回归分析结果表明不同土地利用类型与不同驱动因子之间关系,具体公式详见文献[17]。本研究选取离城镇道路距离(sc1gr0)、离乡村道路距离(sc1gr1)、离城市距离(sc1gr2)、离建制镇距离(sc1gr3)、离村庄居民点距离(sc1gr4)、离水域距离(sc1gr5)、高程(sc1gr6)、坡度(sc1gr7)、起伏度(sc1gr8)等9个因子作为土地利用变化的驱动因子。使用SPSS软件将6种土地利用类型与9种驱动因子进行Logistic回归分析,得到表1中回归方程的系数和常数,用Pontius等提出的ROC(Receiver operating characteristic)方法对回归结果进行检验^[26,36]。ROC值均大于0.7,且大部分高于0.8,说明土地利用类型与驱动因子之间的相关性较好,满足模拟的条件。

(5)创建限制区数据

限制区可使模拟结果更符合研究区实际情况,一般将土地利用结构长期保持稳定的区域作为限制区,包括森林公园、自然保护区等,其对于未来土地利用模拟有很好的修正作用^[37]。已有研究较多考虑的限制因子主要包括国家公园、自然保护区等生态重点保护区,也有研究者将耕地优化作为限制因子,如坡度30°以上的区域禁止转化为耕地和建设用地^[17]。张丁轩等^[38]将基本农田作为模拟的限制区域,WAIYASUSRI等^[24]将野生动物保护区作为一个有限的区域来模拟

Huai Thap Salao 流域的土地利用。本研究以生态保护红线作为限制区,生态保护红线是继“18亿亩耕地红线”(1亩=0.067 hm²)后另一条被提到国家层面的“生命线”,涪陵区内涵盖自然保护区、森林公园等,区域内土地利用长期保持稳定,符合涪陵区实际情况。涪陵区限制区面积约占涪陵区总面积的8%,主要分布在西南部的大木山地区、江东街道中部、荔枝街道中部、荔枝和白涛交界处以及长江沿岸等区域。

1.2.2 改进的输出风险模型

改进后的输出风险模型计算公式如下:

$$L_j = \sum_{i=1}^m E_{ij} \frac{A_i}{A} \quad (1)$$

$$P_j = \frac{L_j - E_h}{L_j} \quad (2)$$

$$R = \sqrt[3]{P_j \cdot (1 - G_{wd}) \cdot G_{ls}} \quad (3)$$

式中: j 为污染物类型,本研究将N、P作为主要污染物类型进行研究; i 为研究区主要的土地利用类型,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地、其他用地; L_j 表示流域内污染物 j 带权重的平均输出系数,kg·hm⁻²·a⁻¹; E_{ij} 表示污染物 j 在第 i 种土地利用类型上的输出系数,kg·hm⁻²·a⁻¹; A_i 表示流域第 i 种地类的面积,hm²; A 为流域内的总面积,hm²; E_h 为林地的最大输出系数,由于是带权重计算,这里假设权重为1时作为林地最大输出系数,kg·hm⁻²·a⁻¹; P_j 为污染物 j 的输出风险概率^[39-40]。林地相比其他用地类型,在自然状态下一般不产生人类活动影响下的面源污染,因此以林地为参考,将林地的最大输出系数作为评价阈值,当某地类输出系数高于阈值时证明该地类存在面源污染风险, P_j 介于-1到1之间,小于0的值赋值为0。由于输出

表1 Logistic 回归分析结果

Table 1 Results of logistic regression analysis

项目 Item	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	其他用地 Other land
sc1gr0	0.000 01	0	0.000 26	-0.000 07	-0.000 21	-0.002 27
sc1gr1	-0.000 13	0.000 25	-0.001 62	0.000 50	-0.005 32	0.002 31
sc1gr2	0.000 01	0	0.000 03	0.000 03	-0.000 09	-0.001 87
sc1gr3	-0.000 04	0.000 09	0.000 06	-0.000 17	-0.000 08	-0.000 91
sc1gr4	-0.006 95	0.002 85	-0.003 13	0.003 44	0.003 61	-0.000 47
sc1gr5	0.000 10	-0.000 07	-0.000 26	-0.010 29	0.000 34	-0.086 37
sc1gr6	-0.001 63	0.002 82	-0.001 03	-0.003 28	-0.004 57	-0.013 00
sc1gr7	-0.051 46	0.081 45	-0.010 52	-0.106 73	-0.016 20	-0.079 49
sc1gr8	-0.000 70	0.000 59	0.003 35	0.000 53	-0.000 88	-0.044 62
常量 Constant	2.638 95	-3.599 70	-7.833 40	0.398 19	-0.307 00	8.719 85
ROC	0.722 00	0.775 00	0.794 00	0.949 00	0.873 00	0.999 00

系数重点考虑输入方面的压力,对于输移过程的难易程度未体现,考虑到增加的因子应是在长时间内保持稳定的因子。因此采用 G_{wd} (归一化处理的距水域距离值)和 G_{ls} (归一化处理的坡长坡度值)作为校正因子以体现驱动动能相关因子的作用。 R 为优化的输出风险指数, R 风险分级时以0.1为间隔分为10个等级,并以Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ表示,等级越高表示风险越高。

各土地利用类型的输出系数是研究的关键,建设用地参考龙天渝等^[9]在三峡库区进行的相关研究;林地、草地参考龙天渝等^[9]、杨彦兰等^[41]在三峡库区进行的相关研究,取二者研究的均值;耕地参考唐肖阳等^[42]的计算方法,取目前不同区域相关研究的均值;水域和其他用地不计算污染排放(表2)。为了判断肥药施用变化对ANSP风险的影响,将目

表2 涪陵区土地利用类型的输出系数($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

Table 2 Output coefficients of different land use types in Fuling District($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

污染类型 Pollution type	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	建设用地 Construction land
TN	24.19	2.60	6.04	13.00
TP	1.86	0.17	0.85	1.80

前输出系数中耕地输出系数分别按 $\pm 5\%$ 和 $\pm 10\%$ 进行测算。

2 结果与分析

2.1 模拟精度与未来土地利用情景模拟结果

2.1.1 模拟2015年土地利用数据进行精度验证

将2015年模拟结果与2015年土地利用现状数据进行对比,各地类面积总量上,耕地、林地、草地、水域、建设用地、其他用地误差分别为8.87%、5.42%、5.12%、0.56%、7.24%、0.09%,总量模拟精度均高于90%;空间布局上,叠加2015年土地利用模拟数据与土地利用现状数据发现,Kappa系数为0.75,位于0.6~0.8之间,属于高度一致性。FoM指标结果为0.23,大于0.21,说明具有较高精度。因此总量和空间布局精度两方面结果表明模拟精度可以满足研究需要。

2.1.2 两种情景下土地利用变化情况

2020、2025、2030年ND和CP两种发展情景下涪陵区土地利用空间分布的模拟结果如图4所示。CP情景的耕地保有量高于ND情景,CP情景的建设用地面积低于ND情景。总体上各土地利用类型面积变化规律符合情景设定情况。CP情景下城市发展更侧重于侵占林地、草地,符合实际发展规律。两种情景

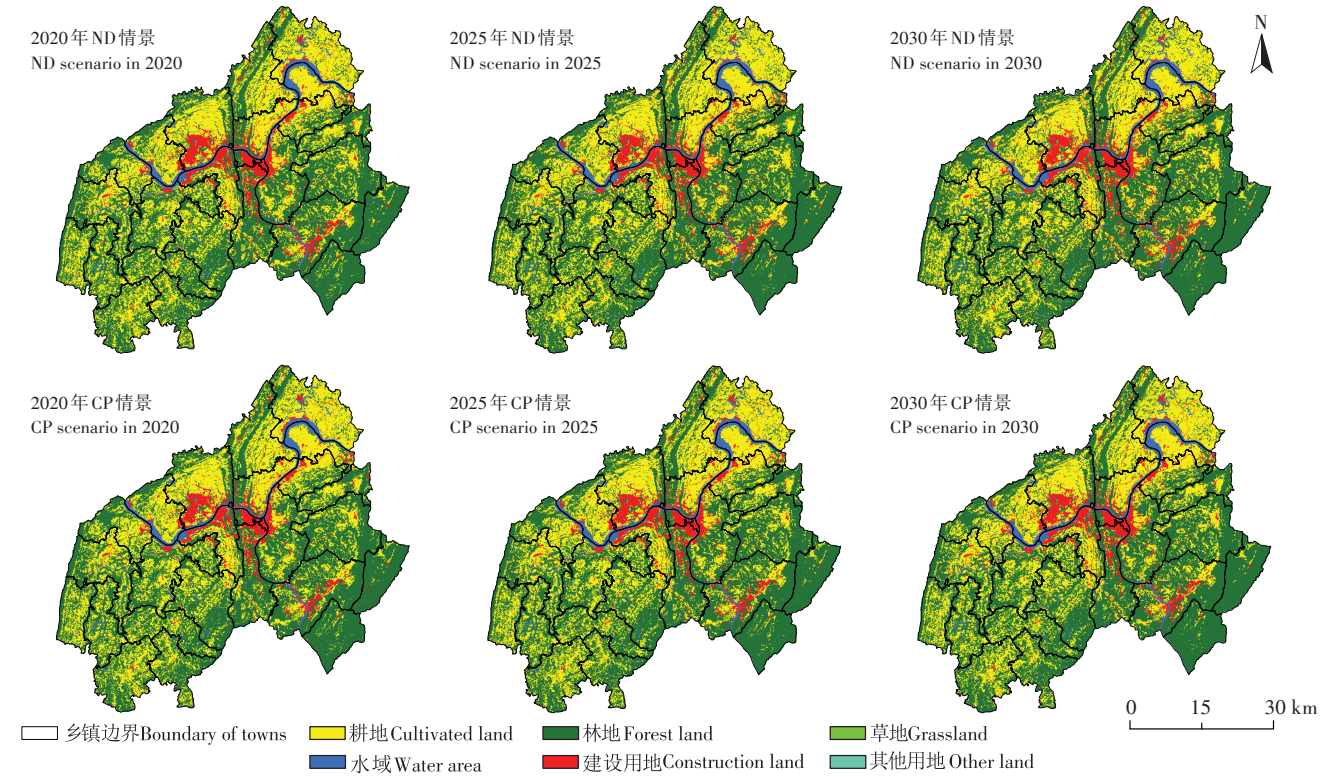


图4 涪陵区未来两种发展情景下土地利用变化情况分布图

Figure 4 Land use distribution map under the two scenarios in Fuling

下各用地类型的空间分布基本一致:(1)耕地广泛分布,但主要分布于长江以北区域。(2)林地分布也比较广泛,但是主要以黄草山、大木山、焦石镇、江东街道等区域为主。(3)水域主要以长江、乌江及其支流为主。(4)建设用地主要分布在涪陵城区、李渡街道、白涛街道等区域,这与涪陵区老城、新城、工业园区规划布局一致。(5)草地、其他用地分布面积较少且分散。

2.2 2010—2015年输出风险分布时空变化

2010—2015年期间风险概率明显降低,尤其是靠近大木山、武陵山区域的镇街和子流域。风险概率等级变化分析发现,区域内存在非常明显的等级降低趋势。从各镇街不同等级TN输出风险面积比例构成来看(TP趋势一致),总体上各镇街TN的ANSP风险等级集中在Ⅲ~Ⅶ级,Ⅲ级及以下等级占比较高的镇街有大木乡、武陵山乡、蔺市镇和龙潭镇,表明这些镇街的低等级风险比例较高;Ⅶ级占比较高的镇街有清溪镇、江东街道、荔枝街道、蔺市镇、涪陵城市区等,表明这些镇街的高风险等级比例较高;Ⅷ级及以上等级占比较高的镇街有江东街道、南沱镇、白涛街道、新妙镇、青羊镇、蔺市镇、明家乡和龙桥街道,其他镇街比例较低。2010年和2015年TN均仅在白涛街道存在分别0.02%和0.01%的Ⅸ级风险分布;2010年在南沱镇、江东街道、白涛街道存在6%以上面积比例的Ⅷ级风险分布,2015年仅南沱镇存在6%以上面积比例的Ⅷ级风险分布;2010年在清溪镇、江东街道存在40%以上面积比例的Ⅶ级风险分布,2015年仅江东街道存在30%以上面积比例分布。数据分析发

现,风险降低的主要原因是区域存在较为明显的林地面积上升、耕地面积减少的趋势(图5)。

2.3 2020、2025、2030年多情景下输出风险演变分析

2020、2025、2030年ND、CP情景模式下TN和TP输出风险概率总体上变化较小,风险概率处于降低的趋势中,CP情景下风险概率总体高于ND情景(图6)。TP风险概率高于TN风险但趋势一致,因此以TP风险概率作为各镇街的风险概率等级进行分析。从空间分布上可以发现,两种模式下在荔枝街道、焦石镇、白涛街道、大木乡、武陵山乡等区域的风险明显低于其他镇街,同时长江以北、乌江以西区域风险明显偏高,这与区域自然资源本底条件吻合。两种发展模式下各风险概率等级的空间差异较小,但CP情景的风险等级高于ND情景。

从2010—2030年各镇街Ⅶ级以上等级风险统计结果来看,2010—2015年风险降幅明显,2015年后风险等级降低速率明显放缓,例如ND情景下,2010、2015、2020、2025、2030年各年份清溪镇Ⅶ级以上等级风险比例分别为46.20%、29.69%、25.72%、22.20%、20.00%。图7明显可看出江东街道、清溪镇、涪陵城市区、蔺市镇等Ⅶ级以上等级风险较多,龙潭镇、大木乡、武陵山乡、罗云乡、焦石镇等高风险分布比例较少。同时从ND和CP两种情景来看,CP情景下各镇街高风险分布比例明显高于ND情景。

2.4 输出风险对输出系数变化的响应分析

输出系数对区域输出风险概率有一定影响,可在一定程度上反映区域施肥状况。鉴于本文重点分析

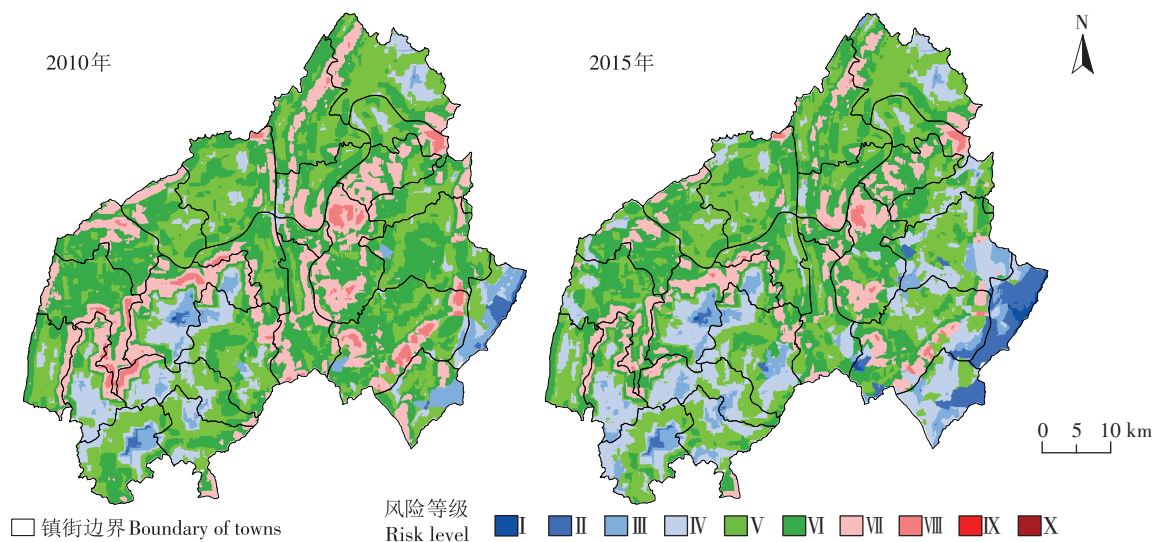


图5 涪陵区2010、2015年TN风险等级分布图(TP与TN空间分布一致)

Figure 5 Distribution map of TN risk level in Fuling District in 2010 and 2015(TP and TN is consistent)

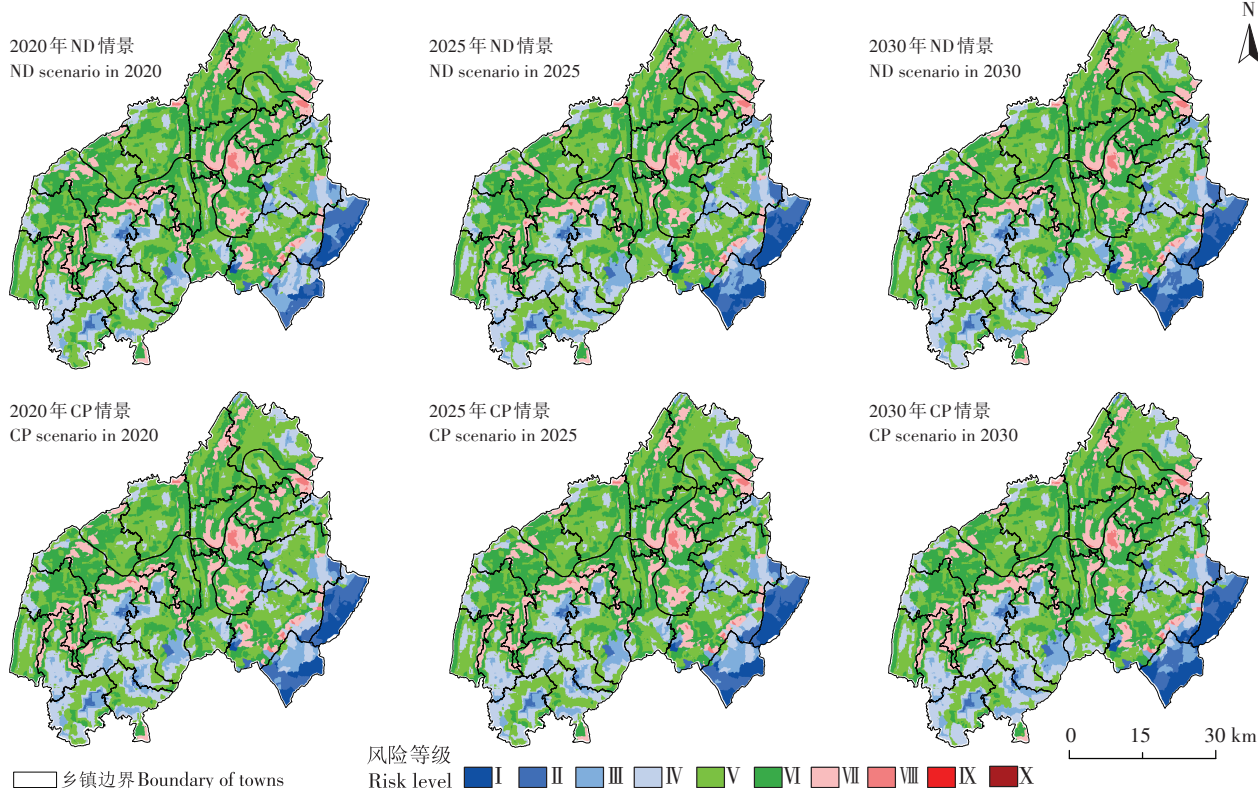


图6 涪陵区2020—2030年TP风险等级分布图

Figure 6 Distribution of TP risk level in Fuling District from 2020 to 2030

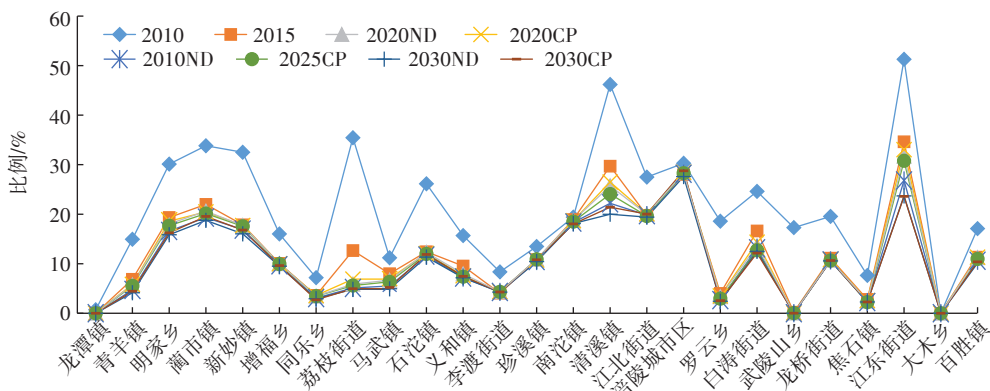


图7 涪陵区各镇街2010—2030年TP风险Ⅶ以上等级范围占区域面积比例分布图

Figure 7 Distribution of proportion of TP risk level above VII to regional area of each town from 2010 to 2030

输出风险对输出系数变化的响应关系,因此测算中按照改进前的输出风险模型进行测算,以便于单纯分析肥药用量变化可能带来的影响,更好地统计子流域的变化情况。假设耕地的TP输出系数分别按照 $\pm 5\%$ 和 $\pm 10\%$ 进行调整,其他土地利用类型的输出系数保持不变,对ND情景下TP输出风险概率变化情况进行分析。

结果表明ND情景下,当输出系数分别上调5%和10%时,2020、2025、2030年的TP输出风险概率在

Ⅸ级及以上等级的子流域个数分别增加6、9个,7、14个,4、11个。当输出系数分别下调5%和10%时,2020、2025、2030年的TP输出风险概率在Ⅸ级及以上等级的子流域个数分别减少4、15个,7、10个,3、8个。从图8分析可以发现,当输出系数上调时低风险等级堆积数降低,反之低风险等级堆积数上升,结果表明区域TP输出风险概率等级与耕地输出系数密切相关,同时表明其与施肥量密切相关。本研究可以通过空间变化很好地判断输出系数变化对哪些具体子流

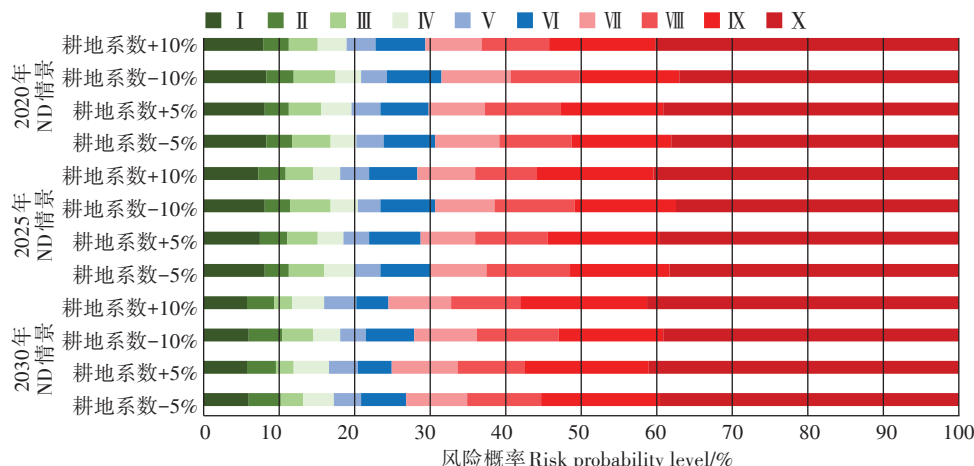


图8 ND情景下耕地输出系数变化对风险概率等级的影响

Figure 8 Maps showing the sub-basins with different risk probability levels under different output coefficients

域影响较大,识别出的子流域是区域土地利用优化和化肥施用控制的关键区域,如第3、75、104、141、202、211、259、292、330、398、461号等子流域对输出系数调减作出了波动响应,第79、118、199、288、315、333、381、400、454号等子流域对输出系数调增作出了波动响应。这些子流域主要位于荔枝街道、马武镇、白涛街道、焦石镇、增福乡、江东街道、同乐乡、龙潭镇等区域,表明输出系数调整(即农药化肥用量调整)后风险等级变化较快的区域主要位于长江以南。

3 讨论

3.1 子流域角度的测算利于展现区域风险实际

已有研究一般以行政单元或大流域为最小研究单元开展输出系数测算。例如,SHEN等^[43]在三峡库区的研究以大流域为研究单元进行风险测算,DURAND等^[44]开展了流域尺度的氮输入变化引起的污染变化研究。本研究在衡量输出风险概率时,选取最能反映区域地理和流域实际状况的子流域范围进行分析,这种测算方式使测算结果更接近区域风险实际,便于研究者和管理者清晰地认识视野范围内的各子流域的TN、TP输出风险概率演变情况,有利于土地利用优化调整或肥药施用方面的管控。

3.2 土地利用演变是产出风险变化的主要驱动力

从产出风险测度结果来看,涪陵大部分地区的风险相对较高,符合区域农业发展的实际情况,这与CHEN等^[45]、ZHU等^[46]的研究基本一致。在不同时期,子流域产出风险的降低或增加与区域土地利用类型的构成密切相关,输出风险高的主要原因是耕地或建设用地比重大。根据土地利用数据统计,2010—2015

年存在较多的耕地转为林地,主要原因是该区坡度基本在20°左右,耕作条件不适宜,导致耕地向林地演变。同时,我国农业人口外流现象普遍存在,导致山区出现耕地抛荒现象,这也是输出风险整体降低的原因之一。在未来情景分析中,CP情景相对ND情景耕地面积较多,这是CP情景产出风险普遍高于ND情景的主要原因之一。

3.3 改进的输出风险模型更能体现污染输移过程差异

改进的输出风险模型引入的距离水域距离因子和坡度坡长因子是影响中小尺度ANSP从“源”到“汇”的重要输移介质。王琦等^[47]在查干湖汇水区开展的ANSP风险识别中引入了距离水域距离和坡度等因子,反映出这些因子对ANSP影响明显。输出风险模型测算原理是以统计单元为基础,对于统计单元内部差异未能体现,改进的输出风险模型可以很好地展现区域内部的风险等级差异。

研究路径与方法在未来可以针对识别出的乡镇、子流域进行土地利用结构优化或肥药施用水平管控,达到ANSP风险防控的目的。由于本研究在输出系数调整中未考虑作物类型,未来将进行深入分析。

4 结论

(1)通过结合CLUE-S与Markov模型的优势在涪陵区开展自然发展和耕地保护两种情景下2020、2025、2030年土地利用空间模拟研究,取得了较好的效果。

(2)涪陵区2010—2015年间农业面源污染风险等级明显降低,但对于南沱镇、江东街道、白涛街道等风险较高的镇街在管理中应重点关注区域肥药施用

强度是否合理,在加强宣传和培训提升肥药利用率的同时降低流失率。

(3)未来的情景模拟有利于探寻区域不同发展情景下输出风险概率与土地利用变化之间的响应关系,以及各区域风险概率演变情况。针对识别出的未来高风险分布较多的区域应加大肥药施用强度管控和景观格局优化力度,有条件的地区可构建林草缓冲带或开展示范区建设以提升农业面源污染消减能力。

(4)子流域输出风险等级对于耕地输出系数变化(即化肥施用水平调整)具有很好的响应关系。自然发展情景下部分子流域对输出系数调减作出了波动响应,这些子流域是风险防控的关键区域,在未来管理中应深入调研分析,提出合理的肥药施用水平以达到降低农业面源污染风险的目的。

参考文献:

- [1] 荆延德, 张华美. 基于LUCC的南四湖流域面源污染输出风险评估[J]. 自然资源学报, 2019, 34(1): 128-139. JING Y D, ZHANG H M. Risk assessment of non-point source pollution output in Nansihu Lake basin based on LUCC[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 128-139.
- [2] HELFAND G E, HOUSE B W. Regulating nonpoint source pollution under heterogeneous conditions[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1995, 77(4): 1024-1032.
- [3] 金书秦, 韩冬梅. 我国农村环境保护四十年: 问题演进、政策应对及机构变迁[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2015, 14(2): 71-78. JIN S Q, HAN D M. A historical review of China's rural environmental protection in the past 40 years: Problems, policy responses, and organization changes[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition)*, 2015, 14(2): 71-78.
- [4] WANG P, KELLER A A. AgInput: An agricultural nutrient and pesticide source model[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2009, 14(3): 391-403.
- [5] BUCKLEY C, CARNEY P. The potential to reduce the risk of diffuse pollution from agriculture while improving economic performance at farm level[J]. *Environmental Science & Policy*, 2013, 25: 118-126.
- [6] LULL K J, TINDALL J A, POTTS D F. Assessing nonpoint-source pollution risk: A GIS application[J]. *Journal of Forestry*, 1995, 93(1): 35-40.
- [7] TAHMASEBI N M, GRIMM K, BAZRKAR M, et al. SWAT modeling of non-point source pollution in depression-dominated basins under varying hydroclimatic conditions[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(11): 1-17.
- [8] CHENG X, CHEN L D, SUN R H. Modeling the non-point source pollution risks by combining pollutant sources, precipitation, and landscape structure[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(12): 11856-11863.
- [9] 龙天渝, 刘敏, 刘佳. 三峡库区非点源污染负荷时空分布模型的构建及应用[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 217-223. LONG T Y, LIU M, LIU J. Development and application of non-point source pollution load model of spatial and temporal distribution in Three Gorges Reservoir region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 217-223.
- [10] ZHU K W, CHEN Y C, ZHANG S, et al. Identification and prevention of agricultural non-point source pollution risk based on the minimum cumulative resistance model[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01149.
- [11] WANG J L, SHAO J A, WANG D, et al. Identification of the "source" and "sink" patterns influencing non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(10): 1431-1448.
- [12] NOURI J, GHARAGOZLOU A, ARJMANDI R, et al. Predicting urban land use changes using a CA-Markov model[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, 39(7): 5565-5573.
- [13] ONSTED J A, CHOWDHURY R R. Does zoning matter? A comparative analysis of landscape change in Redland, Florida using cellular automata[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 121: 1-18.
- [14] LIU X, OU J, LI X, et al. Combining system dynamics and hybrid particle swarm optimization for land use allocation[J]. *Ecological Modelling*, 2013, 257(2): 11-24.
- [15] YANG F, LIU W W, WANG J, et al. Riparian vegetation's responses to the new hydrological regimes from the Three Gorges project: Clues to revegetation in reservoir water-level-fluctuation zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 89-98.
- [16] 朱康文, 雷波, 李月臣, 等. 生态红线保护下的两江新区土地利用/覆盖情景模拟及生态价值评估[J]. 环境科学研究, 2017, 30(11): 1801-1812. ZHU K W, LEI B, LI Y C, et al. Land use cover scenario simulation and ecological value assessment based on the ecological protection red line: Liangjiang New Area case study[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(11): 1801-1812.
- [17] 朱康文, 李月臣, 周梦甜. 基于CLUE-S模型的重庆市主城区土地利用情景模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 789-797. ZHU K W, LI Y C, ZHOU M T. Land use scenario simulation of the main city of chongqing based on the CLUE-S model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(5): 789-797.
- [18] VERBURG P H, SOEPBOER W, VELDKAMP A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model[J]. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [19] 陈玉东, 陈梅, 孙旭, 等. 基于GIS和USLE的龙墩水库小流域土壤侵蚀评估研究[J]. 土壤, 2016, 48(5): 1007-1014. CHEN Y D, CHEN M, SUN X, et al. Evaluation of soil erosion in Longdun Reservoir watershed based on GIS and USLE model[J]. *Soils*, 2016, 48(5): 1007-1014.
- [20] ZHANG H, ZHANG D J, LU P L. Ecological risk assessment of land destruction by shale gas development at Fuling Jiaoshiba, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(17): 5807-5817.
- [21] LIU J, XIE Q, NI J P, et al. The construction of the eco-agricultural yards in Three Gorges Reservoir area based on agricultural non-point source pollution zones[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2431-2441.
- [22] 梁增芳, 肖新成, 倪九派. 农业面源污染认知与调控意愿关系的实证分析——以三峡库区南沱镇为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(3): 125-131. LIANG Z F, XIAO X C, NI J P. An empirical analysis of the relation between the farmers' awareness of agri-

- cultural nonpoint pollution and their willingness to participate in its control: A case study of Nantuo Town in Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2015, 37(3):125-131.
- [23] 欧阳志云, 王桥, 郑华, 等. 全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查评估[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(4):462-466. OUYANG Z Y, WANG Q, ZHENG H, et al. National ecosystem survey and assessment of China (2000—2010) [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(4):462-466.
- [24] WAIYASUSRI K, YUMUANG S, CHOTPANTARAT S. Monitoring and predicting land use changes in the Huai Thap Salao Watershed area, Uthaitani Province, Thailand, using the CLUE-s model[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6):533.
- [25] 孙毅中, 杨静, 宋书颖, 等. 多层次矢量元胞自动机建模及土地利用变化模拟[J]. 地理学报, 2020, 75(10):2164-2179. SUN Y Z, YANG J, SONG S Y, et al. Modeling of multilevel vector cellular automata and its simulation of land use change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10):2164-2179.
- [26] PONTIUS R G, SCHNEIDER L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich Watershed, Massachusetts, USA[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2001, 85(1):239-248.
- [27] PETER H V, WELMOED S, VELDKAMP A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model[J]. *Environmental Management*, 2002, 30(3):391-405.
- [28] KUCSICA G, POPOVICI E A, BĂLTEANU D, et al. Future land use/cover changes in Romania: Regional simulations based on CLUE-S model and corine land cover database[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2019, 15(1):75-90.
- [29] GASHAW T, TULU T, ARGAW M, et al. Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa Watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620:1394-1408.
- [30] HULST R. On the dynamics of vegetation: Markov chains as models of succession[J]. *Plant Ecology*, 1979, 40(1):3-14.
- [31] LIPPE E, DE SMIDT J T, GLENN-EWIN D C. Markov models and succession: A test from a heathland in the Netherlands[J]. *Journal of Ecology*, 1985, 73(3):775-791.
- [32] 刘春艳, 朱康文, 刘吉平. 三峡库区重庆段土地覆盖和生物多样性功能演化及预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19):258-267. LIU C Y, ZHU K W, LIU J P. Evolution and prediction of land cover and biodiversity function in Chongqing section of Three Gorges Reservoir area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(19):258-267.
- [33] ZHENG F, HU Y. Assessing temporal-spatial land use simulation effects with CLUE-S and Markov-CA models in Beijing[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(32):32231-32245.
- [34] VERBURG P H, VELDKAMP A, BOUMA J. Land use change under conditions of high population pressure: The case of java[J]. *Global Environmental Change*, 1999, 9(4):303-312.
- [35] BRITZ W, VERBURG P H, LEIP A. Modelling of land cover and agricultural change in Europe: Combining the CLUE and CAPRI-Spat approaches[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 142(1):40-50.
- [36] ZARE M, SAMANI A A N, MOHAMMADY M. The impact of land use change on runoff generation in an urbanizing watershed in the north of Iran[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(18):1279.
- [37] ZISSIMOS A M, COHEN D R, CHRISTOFOROU I C. Land use influences on soil geochemistry in Lefkosia(Nicosia) Cyprus[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 187:6-20.
- [38] 张丁轩, 付梅臣, 陶金, 等. 基于 CLUE-S 模型的矿业城市土地利用变化情景模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12):246-256, 294. ZHANG D X, FU M C, TAO J, et al. Scenario simulation of land use change in mining city based on CLUE-S model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(12):246-256, 294.
- [39] WICKHAM J D, RIJTERS K H, O'NEILL R V, et al. Land cover as a framework for assessing risk of water pollution[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(6):1417-1422.
- [40] 任玮, 代超, 郭怀成. 基于改进输出系数模型的云南宝象河流域非点源污染负荷估算[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8):2400-2408. REN W, DAI C, GUO H C. Estimation of pollution load from non-point source in Baotianhe watershed based, Yunnan Province on improved export coefficient model[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(8):2400-2408.
- [41] 杨彦兰, 申丽娟, 谢德体, 等. 基于输出系数模型的三峡库区(重庆段)农业面源污染负荷估算[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(3):112-119. YANG Y L, SHEN L J, XIE D T, et al. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Three Gorges Reservoir area (Chongqing) based on the export coefficient modeling approach[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2015, 37(3):112-119.
- [42] 唐肖阳, 唐德善, 鲁佳慧, 等. 汉江流域农业面源污染的源解析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10):2242-2251. TANG X Y, TANG D S, LU J H, et al. Source apportionment of agricultural non-point source pollution in the Hanjiang River basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10):2242-2251.
- [43] SHEN Z Y, QIU J L, HONG Q, et al. Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges Reservoir region[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493:138-146.
- [44] DURAND P, MOREAU P, SALMON-MONVIOLE J, et al. Modelling the interplay between nitrogen cycling processes and mitigation options in farming catchments[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(6):959-974.
- [45] CHEN C L, GAO M, XIE D T, et al. Spatial and temporal variations in non-point source losses of nitrogen and phosphorus in a small agricultural catchment in the Three Gorges region[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(4):1-15.
- [46] ZHU K W, CHEN Y C, ZHANG S, et al. Vegetation of the water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir at the initial impoundment stage[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21:e00866.
- [47] 王琦, 魏来, 韩煜, 等. 查干湖汇水区面源污染风险识别及管控[J]. 环境科学研究, 2020, 33(9):2074-2083. WANG Q, WEI L, HAN Y, et al. Risk identification and control of non-point sources pollution in Chagan Lake catchment area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(9):2074-2083.