

王清睿, 刘瑞民, 门 聪, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 747–755.

WANG Qing-rui, LIU Rui-min, MEN Cong, et al. Land use change predictions based on the CLUE-S model and total phosphorus load analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 747–755.

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

(北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘 要: 本研究旨在比较不同土地利用数量预测方法的适用性, 并结合空间分布预测模型对香溪河流域未来的土地利用进行预测, 以期为该区域的土地利用规划提供决策支持, 有效控制总磷污染负荷的产生。结合土地利用数量预测的 3 种算法(线性外推法、马尔科夫链模型以及遗传算法)与空间预测模型 CLUE-S(Conversion of land use and its effect at small regional extent), 对流域内的土地利用变化进行预测, 通过输出系数法对流域内的总磷污染负荷进行估算。结果表明, 基于线性外推与马尔科夫链两种无约束预测模型, 2020 年流域内林地面积将比 2010 年减少约 1%, 绝大多数林地转变为水田与旱地, 且大多发生在流域中部坡度较平缓区域。而基于存在自然社会经济约束条件的遗传算法优化情景下, 水田面积减少 1060 hm², 旱地面积减少 3370 hm², 其面积主要转化为林地, 且大多发生在流域高海拔、较陡峭的北部区域。基于输出系数法分析得到的流域内总磷污染负荷在线性外推与马尔科夫链预测情景下相比于 2010 年均有所增加, 分别增加 11 000 kg 和 8000 kg, 而在遗传算法情景下, 总磷负荷相比于 2010 年减少约 24 000 kg。空间分布上, 在线性外推与马尔科夫链情景下增加的负荷主要位于流域中部区域, 而在遗传算法情景下流域北部区域总磷负荷减少量最为明显。研究结果表明, 遗传算法在土地利用优化预测方面表现优异, 结合 CLUE-S 模型, 可以对未来土地利用规划起到一定的支持作用, 有效控制非点源污染负荷的产生。

关键词: 马尔科夫链; 遗传算法; CLUE-S 模型; 非点源污染; 输出系数法

中图分类号: X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)04-0747-09 doi:10.11654/jaes.2017-1500

Land use change predictions based on the CLUE-S model and total phosphorus load analysis

WANG Qing-rui, LIU Rui-min*, MEN Cong, GUO Li-jia

(School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In this study, we analyzed the feasibility of three quantitative land use prediction methods. These three models were the linear extrapolation method, the Markov chain model, and the genetic algorithm. They were combined with the CLUE-S model to predict land use changes in 2020 in the Xiangxi Watershed. Our research provided supporting information for land use plans in the study area and gave indications to reduce the discharge of non-point source pollution. When using either the linear extrapolation method or the Markov chain model, the forest area decreased by more than 1% from 2010 to 2020. This area mainly changed to paddy fields and dry land, which was located in the central area of the watershed on a relatively gentle slope. However, when using the genetic algorithm and appropriate environmental, social, and economic constraints, the areas of paddy field and dryland decreased by 1060 hm² and 3370 hm², respectively. This area was mainly converted to forest located in the north of the watershed at high altitude on steep slopes. Based on the export coefficient method, the total phosphorus loads from the whole watershed were calculated to be 11 000 kg and 8000 kg higher in 2020 than in 2010, using the linear extrapolation method and the Markov chain method, respectively. The phosphorus load in 2020 predicted by the genetic algorithm was 24 000

收稿日期: 2017-10-12 录用日期: 2017-12-20

作者简介: 王清睿(1994—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为水资源与水环境。E-mail: wangqr@mail.bnu.edu.cn

* 通信作者: 刘瑞民 E-mail: liurm@bnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571486)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41571486)

kg lower than in 2010. Spatially, the increased phosphorus load and decreased phosphorus load mainly occurred in the central area and the northern area of the watershed, respectively. This research thus compared three land use area prediction methods and identified the best one. The land use structure in 2020 was simulated and the total phosphorus load and distribution were predicted by integrating the quantity prediction method and the spatial land use distribution model. The result would provide a good reference for future land use planning in the study area.

Keywords: Markov chain; genetic algorithm; CLUE-S model; non-point source pollution; export coefficient method

点源与非点源是水体污染的两个重要来源。点源污染主要来源于工业污水与生活污水排放,这些污染排放具有确定的排污口。随着点源污染治理技术的进步与管理措施的完善,非点源污染对水环境的影响显得越来越突出。相比于点源污染,非点源污染的污染物种类和排放位置具有不确定性,使得其对水环境的威胁更大^[1]。

非点源污染的研究与治理在国外发展较早,20世纪70年代已经有了系统性的研究。利用模型对非点源污染进行模拟已经成为重中之重。模型的发展主要有三个阶段:第一个阶段是以经验建立土地利用与污染负荷之间的关系来模拟非点源污染,主要有美国的通用土壤流失方程模型和径流曲线模型^[2-3];第二个阶段是确定性模型阶段,该类模型与3S技术相结合,可以大大提高模拟精度与效率,主要包括CREAMS模型与ANSWERS模型^[4-5];第三个阶段是随机模型阶段,该类模型主要为了解决输入信息的不确定性、参数设定不准确等问题,主要包括Jury的传递函数理论等。

非点源污染在国内的研究发展较国外晚,当下主要是使用国外开发的水文水质模型对大中小型流域进行非点源污染模拟,比如SWAT模型^[6-7]。然而,由于国内大多数流域缺乏长期的监测数据,使得模型在率定验证阶段无法得到准确的结果,构建的模型与实际情况差距较大,精度难以达到要求。因此,由北美国家学者提出的非点源污染输出系数法得到许多学者的青睐。输出系数法对数据要求较少,建模简单,并且在大中尺度的流域具有较好的模拟适用性,因此被国内学者广泛应用并不断改进完善^[8-10]。

非点源污染的影响因素很多,包括污染物的种类、环境的自我净化能力、经济因素以及土地利用的规划与布局。许多学者对这些影响因素进行了研究探讨,其中,土地利用的合理性对非点源污染产生的影响重大^[11-12]。不合理的土地利用布局会导致严重的土壤流失与营养盐流失,从而产生水体富营养化现象。所以,土地利用的规划与优化是解决非点源污染的重要方面。

国内外学者对土地利用的数量优化进行了很多研究,包括使用线性规划、系统动力学和各种优化算法对土地利用数量进行分配^[13-15]。然而,不同区域的自然社会经济状况不同,导致其在相同土地利用类型上产生的非点源污染也不尽相同,仅进行数量上的优化分配往往不够,还需要考虑到空间异质性。因此,空间上的优化分配与数量上的优化相结合是研究的重点。CLUE-S(Conversion of land use and its effect at small regional extent)模型考虑了影响土地利用空间分配的各种影响因子,使用概率的方法在保持总量不变的情况下对土地利用在空间上进行分配,由于其模拟结果较为精确,近年来被许多学者用来预测土地利用的变化^[16-18]。

本研究以香溪河流域为例,在土地利用数量变化上,考虑应用线性外推法和马尔科夫链法,因为它们是现今学者使用最多的两种预测方法,两者各有优缺点,前者计算简单,而后者考虑到了土地利用变化的随机性。而优化算法使用较少,但是由于其考虑到了环境社会经济等各方面的约束,模拟精度较高。因此,本研究采用线性外推法、马尔科夫链以及遗传算法3种方法对香溪河流域的土地利用数量进行分配,并对3种方法的模拟结果加以对比讨论,分析方法的适用性。在数量预测的基础上,结合CLUE-S模型,对香溪河流域未来的土地利用空间格局变化加以预测,并基于输出系数法,对香溪河流域的总磷负荷进行模拟。本研究旨在分析不同土地利用数量预测方法的模拟性能,选择最优方法。其次,分析预测香溪河流域未来土地利用的变化趋势以及总磷负荷的总量变化与空间分布改变,为未来土地利用管理规划提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区范围

香溪河位于湖北省西部,是流经湖北兴山与秭归的最大河流。流域占地约3200 km²,海拔110~3088 m,干流全长94 km,是三峡水库湖北库区内的第一大

支流。南阳河、古夫河、高岚河为香溪河流域的三大支流,另有上百条小型支流。香溪河由北向南经过兴山县,在秭归县香溪镇流入长江。流域水利资源十分丰富,年平均径流量 $63.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,最大流量 $2700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,最小流量 $8.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。香溪河流经高桥乡、古夫镇、昭君镇、峡口镇、南阳镇、黄粮镇、榛子乡和水月寺镇。共包含 109 个行政村。2012 年全县总人口 174 707 人,其中农业人口 131 904 人,占 75.51%,非农业人口 42 803 人,占 24.49%(图 1)。

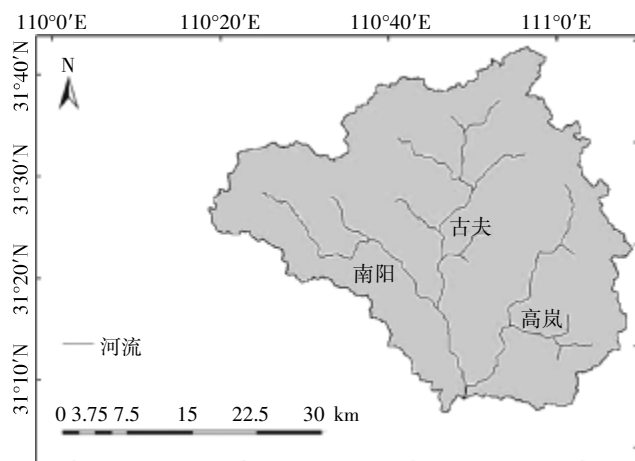


图 1 香溪河流域地理位置

Figure 1 Location of Xiangxi River basin

1.2 模型介绍

马尔科夫链是数学中具有马尔科夫性质的离散时间随机过程。对于离散时间随机过程,在给定当前知识或信息的情况下,过去(即当期以前的历史状态)对于预测将来是无关的。因此,马尔科夫链有众多的应用,如人口过程、排队理论、食品价格趋势预测、统计学应用等^[19-21]。马尔科夫链也被一些学者用来预测土地利用的变化^[22-23]。

设 $E(0)=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_i]$ 为土地利用面积的初始状态, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$ 分别为第 i 种土地利用的初始面积。马尔科夫链的关键是为求出一步转移矩阵 P (公式 1)。此步骤可在 ArcGIS 中完成。

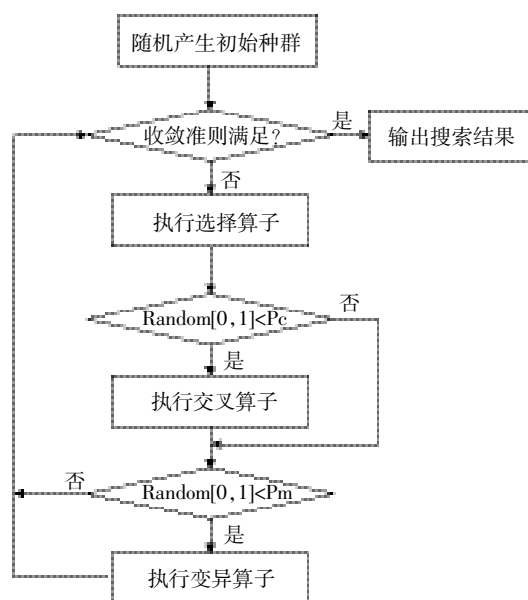
$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1i} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i2} & \dots & P_{ii} \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据初始状态向量 $E(0)$ 与一步转移矩阵 P , 即可得到以后每一年的土地利用面积 $E(i)$ (公式 2), $i=$

$1, 2, 3, \dots, k$ 。

$$E(i) = E(i-1) \times P \quad (2)$$

遗传算法是一类借鉴生物界的进化规律演化而来的随机优化搜索算法^[24-25]。其主要特点是直接对结构对象进行操作,不存在求导和函数连续性的限定,具有内在的隐并行计算性和更好的全局寻优能力。遗传算法采用概率化的寻优方法,能自动获取和指导优化的搜索空间,自适应地调整搜索方向,不需要确定的规则。基于遗传算法的函数寻优计算,针对适应度函数,能够实现较快的收敛计算,寻优结果较合理,鲁棒性较好。遗传算法主要包括初始群体的生成、杂交、适应度值评估检测、选择、变异以及终止 6 个过程。可在 MATLAB 中实现。遗传算法实现流程如下:



CLUE-S 模型包含两个独立的模块:空间分配模块和需求模块。需求模块在模型运行时计算各个土地利用类型的面积,空间分配模块基于栅格对土地利用进行空间上的分配^[26]。

需求模块可以与多种数学方法相结合,包括线性外推法、马尔科夫链等。方法的选择基于数据的可获取性以及精度要求。空间分配模块基于概率图进行分配。概率计算公式如下^[27]:

$$TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELAS_u + ITER_u \quad (3)$$

式中: $TPROP_{i,u}$ 代表第 i 个栅格对应第 u 种土地利用类型的总概率; $P_{i,u}$ 为通过 Logistic 回归得到的第 i 个栅格第 u 种土地利用类型的概率; $ELAS_u$ 代表第 u 种土地利用类型的相对弹性; $ITER_u$ 为迭代系数。

本研究采用输出系数法对以磷为代表的非点源

污染进行估算,输出系数采用相关学者总结的我国长江中上游不同土地利用类型总磷输出系数^[28](表 1)。该系数是基于对已有关于长江中上游非点源污染研究成果的总结归纳得来^[29-31],并且已经得到很多学者的认可与应用^[32-34],因此较为可靠。

表 1 长江中上游各土地利用类型总磷输出系数

Table 1 Export coefficient of different land use types at upper and middle Yangtze River area

项目	耕地	林地	草地	城镇	水域
总磷输出系数/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	5.94	0.57	1.18	2.75	0

总磷负荷计算公式如下:

$$L_p=0.57x_1+1.18x_2+0x_3+2.75x_4+5.94(x_5+x_6) \quad (4)$$

式中: L_p 代表总磷负荷,kg·a⁻¹; x_1 到 x_6 分别代表林地、草地、水域、城镇、水田和旱地的面积, hm²。

1.3 数据来源与处理

香溪河流域 2000 年与 2010 年土地利用数据通过对 Landsat5 TM 数据解译获得。DEM 数据来源于地理空间数据云(www.gscloud.cn)下载的 SRTMDEM 90M 分辨率数据。土壤数据来源于中科院地理所。香溪河流域社会经济数据来源于《兴山县农村经济发展公报》与《兴山县统计年鉴》。研究区内道路、河流、居民地空间数据通过 ArcGIS 数字化得到。

1.4 模型构建

首先基于 2000 年与 2010 年的土地利用状况,分别使用线性外推法、马尔科夫链法与遗传算法对 2020 年土地利用数量进行预测。

线性外推法较为简单,根据 2000—2010 年的变化趋势进行推算,假设每年变化方向与速度不变。

利用 ArcGIS 中的叠加分析等功能获得 2000—2010 年土地利用的转移矩阵,进而使用马尔科夫链法对 2020 年的土地利用进行预测。

遗传算法使用的关键是建立合理的目标函数与相关约束。本研究使用的目标函数为香溪河流域年总磷负荷(公式 4),约束条件如表 2 所示。

选取 2000 年土地利用空间分布图作为 CLUE-S 土地利用初始输入,驱动因子选取高程、坡度、坡向、到城镇距离、到主要河流距离、到公路距离以及土壤类型和人口密度。土地利用弹性系数设置主要依据相关文献以及实地调查结果。

以线性外推法、马尔科夫链法以及遗传算法得到的 2020 年土地利用数量预测作为 3 种情景输入 CLUE-S 模型进行 2020 年土地利用空间分布预测。

首先基于 2000 年土地利用模拟得到 2010 年土地利用空间分布,基于 Kappa 系数对 CLUE-S 模拟效果进行验证。验证后对各个情景分别进行模拟,Kappa 系数定义如下:

$$Kappa=(P_0-P_c)/(P_p-P_c) \quad (5)$$

式中: P_0 为正确模拟的比例; P_c 为在随机情况下正确模拟的比例; P_p 为在理想状态下正确模拟的比例。

最后,根据总磷负荷输出系数法对香溪河流域总磷年负荷进行预测,并分析在不同情景下总磷污染负荷总量变化与空间分布转变。

2 结果与讨论

2.1 基于不同算法的土地利用数量预测

由表 3 可知,基于线性外推法得到的水田、旱地面积均有增加,分别增加 124,1857 hm²,草地、水域与城镇面积也均有所增加,林地面积减少约 1%。说明如果按 2000—2010 年的变化趋势进行发展,至 2020 年农田面积会大幅增加,而且主要来源于对林地的砍伐。此种预测方法假设每年的变化趋势保持不变,显然有其局限性。而根据马尔科夫链预测得到的土地利用面积结果显示,水田面积相比于 2010 年反而减少,旱地面积增加,但与线性外推法得到的旱地面积相比有所减少,林地面积减少较为缓和。草地、水域与城镇模拟结果无明显差异。由遗传算法预测得到的土地利用数量与前两种模拟结果差异较大。水田、旱地面积均大幅减少,但是由于约束条件的存在,农田面积仍然可以达到 2020 年规划的农田保有量。林地面积相比

表 2 土地利用优化遗传算法的约束条件

Table 2 Constraint condition set in Genetic algorithm for land use optimization

约束条件	约束表达式	约束说明
土地面积	$x_1+x_2+x_3+x_4+x_5+x_6=300\ 782$	所有土地利用类型面积之和等于研究区总面积
	$x_4>541$	城镇面积大于规划中设定面积
	$13\ 000\leq x_5+x_6<300\ 782$	水田与旱地面积大于规划中农田保有量
人口约束	$6.4(x_5+x_6)+150x_4\leq 197\ 000$	人口不大于规划中预测的 2020 年人口数量
经济约束	$185\ 400\leq 1.92(x_5+x_6)+156(x_3+x_4)\leq 750\ 000$	第一、第二、第三产业总产值大于 2000 年产值,低于 2020 年规划值

表 3 2020 年不同情景下土地利用面积预测
Table 3 Prediction of land use area under different scenarios in 2020

情景	面积/hm ²					
	林地	草地	水域	城镇	水田	旱地
2010 年原始	262 656	14 693	717	193	5310	17 210
线性外推	259 891	14 826	920	641	5434	19 067
马尔科夫链	260 620	14 820	900	600	5070	18 760
遗传算法	266 500	14 442	1220	530	4250	13 840

于 2010 年有所增加, 这与规划中提到的在坡度较大区域实施退耕还林措施保持一致。遗传算法考虑到了多种因素的影响, 能够更为精确地代表在有人为约束的情况下土地利用的变化情况。

2.2 基于 CLUE-S 的土地利用空间分配分析

基于 2000 年模拟得到的 2010 年土地利用结果与实际 2010 年土地利用分布图进行 Kappa 系数验证(图 2), 经验证得到 Kappa 系数为 0.89, 符合精度要求, 说明 CLUE-S 模型可以在香溪河流域对土地利用进行模拟预测。

通过对比 3 种土地情景下的土地利用空间分布图(图 3), 可知在线性外推和马尔科夫链情景下, 2020 年土地利用空间分布差异不明显, 相比于 2010 年的土地利用, 旱地面积增加, 主要位于流域中部与西南部。这是由于中部与西南部坡度较其他区域平缓, 利于种植, 且离道路、居住地等距离较近, 便于运输, 因此, 耕地的适宜性较强, 在耕地面积增加的情况下, 最有可能由林地转变为旱地。在遗传算法情景下, 2020

年水田与旱地面积显著减少, 林地面积显著增多。由水田旱地向林地的转变大多数发生在流域的北部区域。这是由于北部区域为高海拔区域且坡度较大, 绝大多数区域为原始森林, 且离居民区距离很远, 因此, 耕地的适宜度很低, 而林地的适宜度很高。因此在分配的过程中被改变为林地。

2.3 基于输出系数法的总磷污染负荷分析

由总磷污染输出系数法计算得到 2010 年以及 3 种情景下 2020 年的总磷年负荷(图 4)。

相比于 2010 年的总磷负荷, 线性外推与马尔科夫链预测情景下 2020 年总磷负荷均有增加, 分别增加了 11 000、8000 kg。这表明, 如果按照这两种趋势进行发展, 至 2020 年, 香溪河流域内由于总磷负荷造成的非点源污染状况将更为严重。旱地由于其土壤侵蚀较为严重, 因此总磷输出系数较高, 而大量面积的土地由总磷污染输出系数较低的林地转变为旱地, 导致了整个流域总磷负荷的增加。而在遗传算法情景下模拟得到的结果显示, 2020 年总磷负荷显著降低, 相比于 2010 年减少了约 24 000 kg。这是由于在遗传算法情景下, 在保证耕地面积满足国家规定的基础上, 通过优化计算, 将原本不应该用作耕地的土地转变为林地。在保证农作物产量要求、经济发展水平的情况下, 兼顾环境效益, 尽可能地降低总磷污染负荷量, 属于合理的分配方法。因此, 此情景下的土地利用格局有利于非点源污染负荷的控制, 是未来土地利用规划的方向。

在空间分布上, 首先根据研究区的地形特征, 将香溪河流域划分为 27 个子流域。随后在 ArcGIS 中根

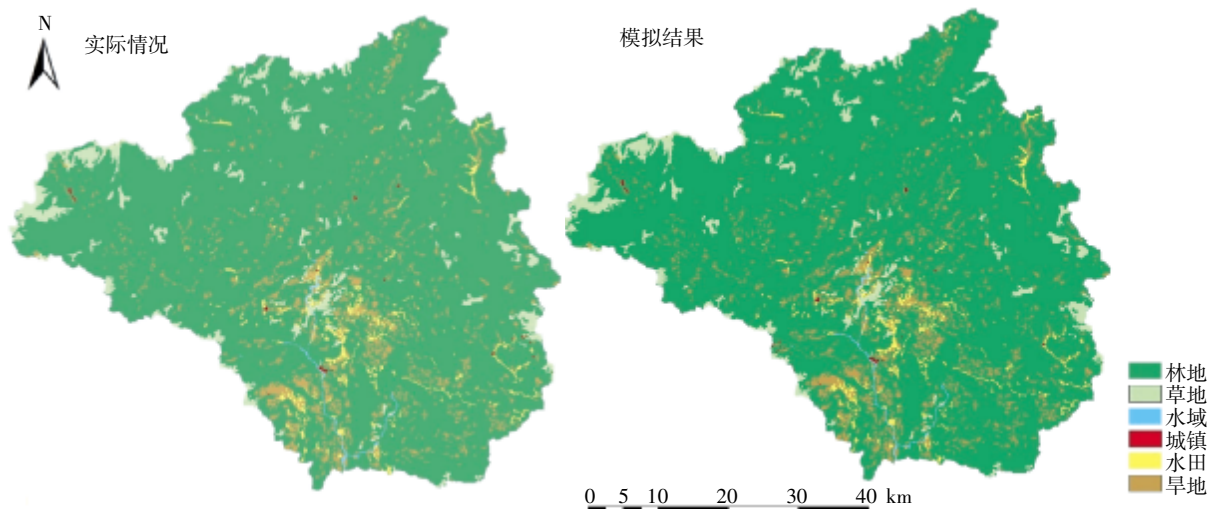


图 2 2010 年模拟与实际土地利用空间分布

Figure 2 Simulated and real spatial distribution of land use in 2010

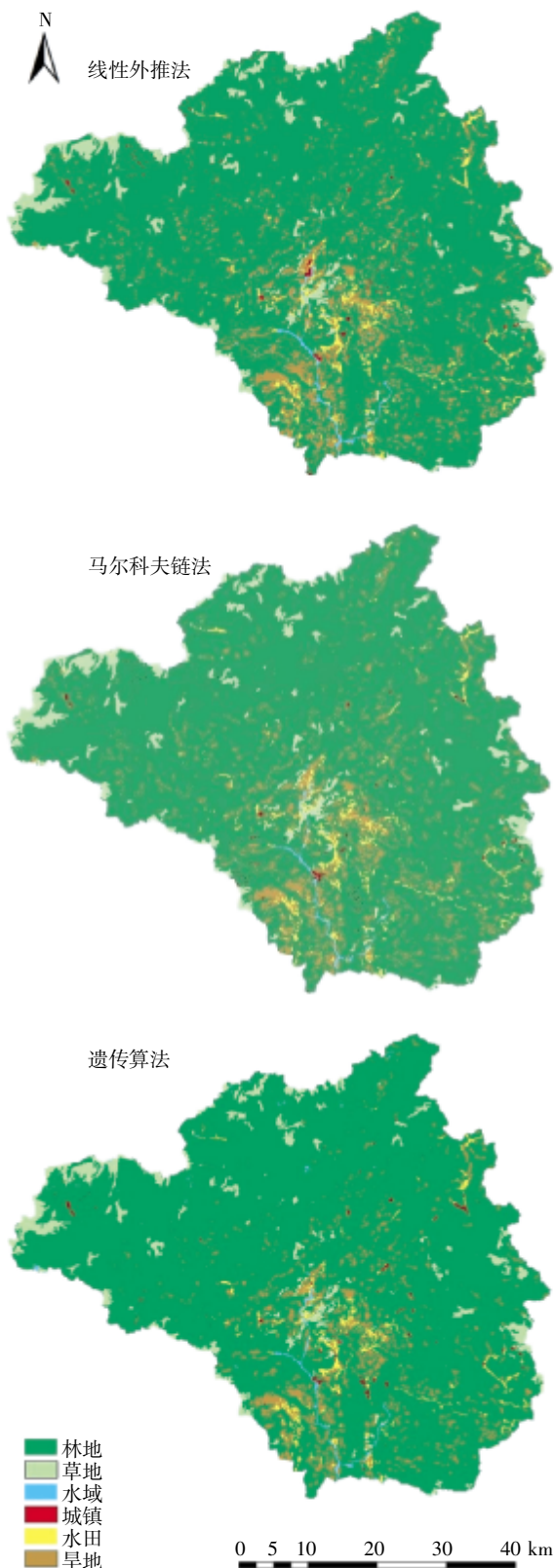


图 3 2020 年不同情景下土地利用空间分布
Figure 3 Spatial distribution of land use under different scenarios in 2020

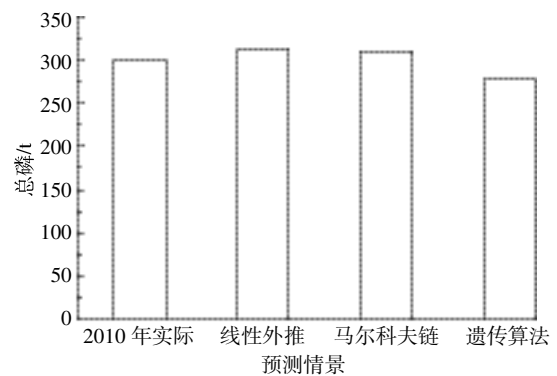


图 4 不同情景下的 2020 年总磷年负荷
Figure 4 Total annual phosphorus load in 2020 under different scenarios

据每个子流域中各土地利用类型所占面积对总磷负荷进行空间分配(图 5),得到每个子流域各自的污染负荷。

对比 3 种情景下的总磷负荷空间分布结果可知,线性外推与马尔科夫链情景下的空间分布状况比较类似,相比于 2010 年的总磷负荷分布,2020 年流域中部区域有较为明显的负荷增加现象。经过计算,位于流域中部的子流域总磷负荷增加量超过整个流域总负荷增加量的 80%。对比土地利用预测图,林地向耕地的转变主要发生在流域的中部区域,耕地面积的增加,导致总磷负荷的增加。在遗传算法情景下,2020 年流域北部区域的总磷负荷有较为明显的降低,占整个流域总磷总削减量的 70%以上。对比土地利用变化图,正是由于北部区域大面积的耕地转变为林地,使得污染产生量大幅降低。但是,由于输出系数法没有考虑到污染物产生排放的空间异质性,计算结果会有一定的误差。由于北部区域多为坡度较大区域,坡耕地的水土流失情况相比于一般耕地更为严重,因此,此区域内的退耕还林可以非常有效地控制总磷的流失,效果可能比采用本文所用输出系数法计算得到的效果更为明显。但考虑到数据收集的难易程度以及计算的简便程度,本文使用的输出系数法计算得到的由于土地利用方式转变而对总磷输出起到的控制效果具有一定的参考意义。

3 结论

本研究基于 3 种不同的土地利用数量预测模型结合 CLUE-S 模型对香溪河流域 2020 年的土地利用结构进行了预测,综合比较 3 种方法,由于遗传算法考虑到环境、经济、社会方面的约束,具有优化分配的能力,在 3 种方法中预测效果最好,对未来土地利用

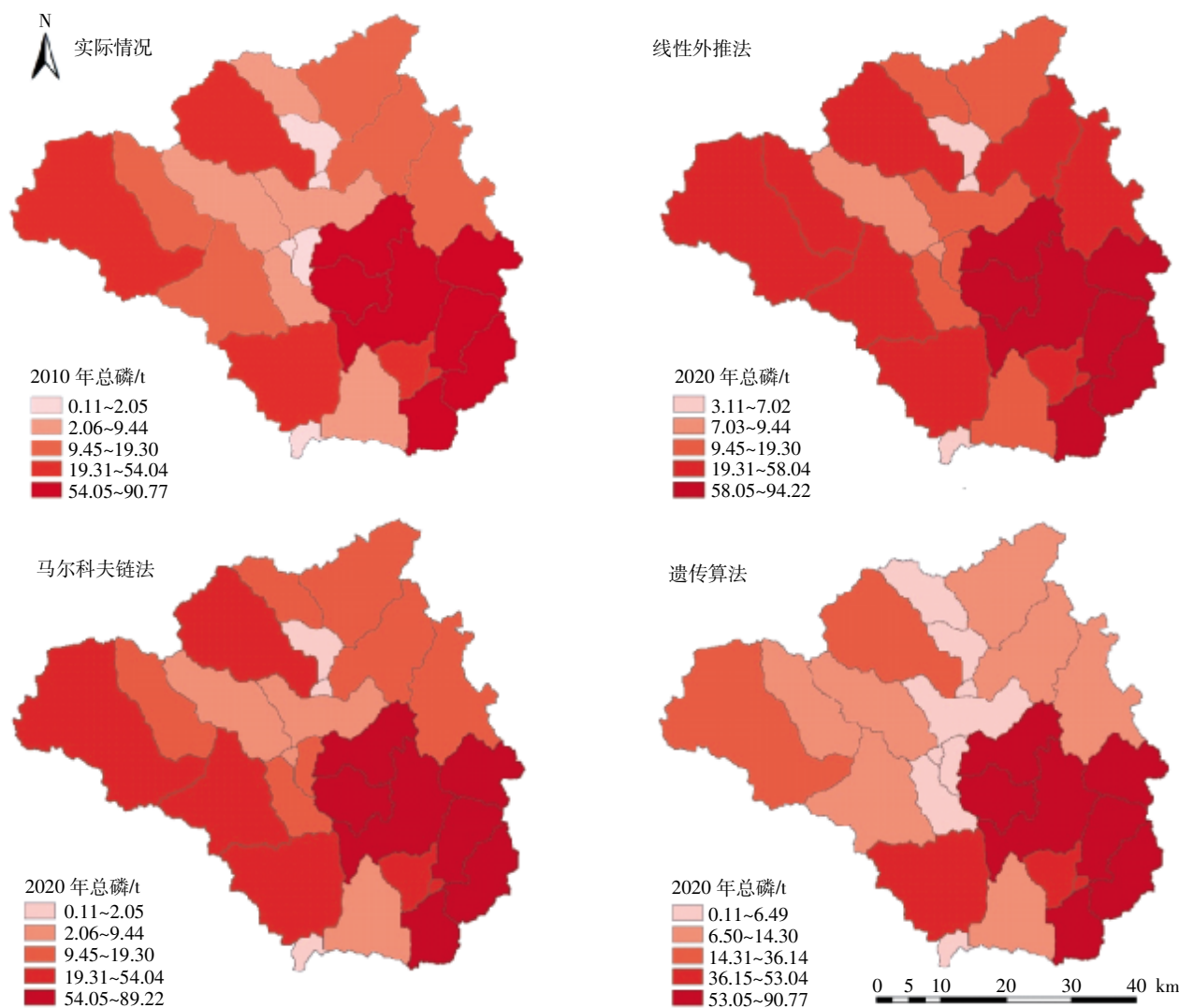


图 5 总磷年负荷空间分布

Figure 5 Spatial distribution of total annual phosphorus load

的优化规划具有一定的指导意义。

CLUE-S 的模拟结果表明在耕地面积减少的情况下,耕地主要转变为林地,且主要发生在流域的北部区域。在遗传算法情景下,北部坡度较大区域大面积耕地面积的减少可以有效地降低水土流失量,进而对总磷污染负荷起到削减作用。

基于输出系数法的流域总磷负荷模拟结果表明在不受约束的情况下,由于耕地面积的增加,流域内的总磷负荷有所提高,中部区域尤为明显。而在遗传算法情景下,由于耕地面积的大幅减少,北部区域的总磷负荷明显降低,起到了较好的控制作用。

本研究结合了土地利用数量预测模型与空间预测模型,对香溪河流域的土地利用进行了有效预测,并对不同情景下的总磷负荷进行了估算,对研究区未来的土地利用规划有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 夏 军,翟晓燕,张永勇. 水环境非点源污染模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7):941-952.
XIA Jun, ZHAI Xiao-yan, ZHANG Yong-yong. Research progress of non-point source pollution model of water environment[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(7):941-952.
- [2] Kinnell P I A. Event soil loss, runoff and the universal soil Loss equation family of models: A review[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 385(1):384-397.
- [3] Mishra S K, Singh V P. Special issue on soil conservation service curve number(SCS-CN) methodology introduction[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(11):1157.
- [4] De Roo A P J, Hazelhoff L, Burrough P A. Soil erosion modelling using 'ANSWERS' and geographical information systems[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1989, 14(6):517-532.
- [5] Emili L A, Greene R P. Modeling agricultural nonpoint source pollution using a geographic information system approach[J]. *Environmental Man-*

- agement, 2013, 51(1):70-95.
- [6] 魏冲, 宋轩, 陈杰. SWAT模型对景观格局变化的敏感性分析——以丹江口库区老灌河流域为例[J]. 生态学报, 2014, 34(2):517-525.
- WEI Chong, SONG Xuan, CHEN Jie. Sensitivity analysis of SWAT model on changes of landscape pattern: A case study from Lao Guanhe Watershed in Danjiangkou Reservoir area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2):517-525.
- [7] 杨建军, 高小红, 李其江, 等. 湟水流域SWAT模型构建及参数不确定性分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1):82-88, 93.
- YANG Jun-jun, GAO Xiao-hong, LI Qi-jiang, et al. SWAT model construction and uncertainty analysis on its parameters for the Huangshui River basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1):82-88, 93.
- [8] 常丽娟. 基于改进的输出系数模型对三峡库区非点源氮磷污染负荷的模拟研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
- CHANG Li-juan. Study on the nitrogen and phosphorus load of non-point source pollution in Three Gorges Reservoir area by using the improved export coefficient model[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [9] 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 Wei, DAI Chao, GUO Huai-cheng. Estimation of pollution load from non-point source in Baoxianghe watershed based, Yunnan Province on improved export coefficient model[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(8):2400-2408.
- [10] 杨维, 杨肖肖, 吴燕萍, 等. 基于输出系数法核定双台子河非点源污染负荷[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(2):338-343.
- YANG Wei, YANG Xiao-xiao, WU Yan-ping, et al. Based on export coefficient theory in simulating pollution load of non-point source of Shuangtaizi River[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)*, 2012, 28(2):338-343.
- [11] 李明涛. 密云水库流域土地利用与气候变化对非点源氮、磷污染的影响研究[D]. 北京:首都师范大学, 2014.
- LI Ming-tao. Impacts of land use and climate changes on nonpoint source nitrogen and phosphorus pollution in the Miyun Reservoir watershed[D]. Beijing: Capital Normal University, 2014.
- [12] 孙丽娜, 卢文喜, 杨青春, 等. 东辽河流域土地利用变化对非点源污染的影响研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(8):1459-1467.
- SUN Li-na, LU Wen-xi, YANG Qing-chun, et al. Effect of future land use caused change on the non-point source pollution in Dongliao River watershed[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(8):1459-1467.
- [13] 胡雪丽, 徐凌, 张树深. 基于CA-Markov模型和多目标优化的大连市土地利用格局[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6):1652-1660.
- HU Xue-li, XU Ling, ZHANG Shu-shen. Land use pattern of Dalian City, Liaoning Province of Northeast China based on CA-Markov model and multi-objective optimization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(6):1652-1660.
- [14] 徐昔保. 基于GIS与元胞自动机的城市土地利用动态演化模拟与优化研究[D]. 兰州:兰州大学, 2007.
- XU Xi-bao. Research on dynamic simulation and optimization of urban land use based on GIS and cellular automata[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007.
- [15] 张鸿辉, 曾永年, 谭荣, 等. 多智能体区域土地利用优化配置模型及其应用[J]. 地理学报, 2011, 66(7):972-984.
- ZHANG Hong-hui, Zeng Yong-nian, TAN Rong, et al. A model for regional land use optimization allocation based on multi-agent system and its application[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7):972-984.
- [16] 冯仕超, 高小红, 顾娟, 等. 基于CLUE-S模型的湟水流域土地利用空间分布模拟[J]. 生态学报, 2013, 33(3):985-997.
- FENG Shi-chao, GAO Xiao-hong, GU Juan, et al. Land use spatial distribution modeling based on CLUE-S model in the Huangshui River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3):985-997.
- [17] 李鑫, 马晓冬, 肖长江, 等. 基于CLUE-S模型的区域土地利用布局优化[J]. 经济地理, 2015, 35(1):162-167, 172.
- LI Xin, MA Xiao-dong, XIAO Chang-jiang, et al. The regional land use layout optimization based on the CLUE-S model[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(1):162-167, 172.
- [18] 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 Ding-xuan, FU Mei-chen, TAO Jin, 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.
- [19] 丁明, 鲍玉莹, 毕锐. 应用改进马尔科夫链的光伏出力时间序列模拟[J]. 电网技术, 2016, 40(2):459-464.
- DING Ming, BAO Yu-ying, BI Rui. Simulation of PV output time series used improved Markov chain[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2):459-464.
- [20] 廖普明. 基于马尔科夫链状态转移概率矩阵的商品市场状态预测[J]. 统计与决策, 2015(2):97-99.
- LIAO Pu-ming. Prediction of the status of commodity market based on the Markov chain[J]. *Statistics and Decision*, 2015(2):97-99.
- [21] 王勇, 韩学山, 丁颖, 等. 基于马尔科夫链的电力系统运行可靠性快速评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2):405-410.
- WANG Yong, HAN Xue-shan, DING Ying, et al. Markov chain-based rapid assessment on operational reliability of power grid[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(2):405-410.
- [22] 刘复刚, 张水胜, 张绪教, 等. 利用马尔科夫链预测齐齐哈尔土地利用结构变化[J]. 高师理科学刊, 2011, 31(4):63-65, 72.
- LIU Fu-gang, ZHANG Shui-sheng, ZHANG Xu-jiao, et al. Using Markov-chain to predict the land-use structure variation of Qiqihar[J]. *Journal of Science of Teachers' College and University*, 2011, 31(4):63-65, 72.
- [23] 朱萌, 马孝义, 刘雪娇. 基于马尔科夫模型的武功县土地利用/覆被动态变化研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5):64-68.
- ZHU Meng, MA Xiao-yi, LIU Xue-jiao. Dynamic changes of land use/cover based on Markov model in Wugong County, Shaanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(5):64-68.

- [24] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 2911-2916.
GE Ji-ke, QIU Yu-hui, WU Chun-ming, et al. Summary of genetic algorithms research[J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(10): 2911-2916.
- [25] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1201-1206, 1210.
MA Yong-jie, YUN Wen-xia. Research progress of genetic algorithm [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(4): 1201-1206, 1210.
- [26] Zhou F, Xu Y P, Chen Y, et al. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 485: 113-125.
- [27] Cai Y M, Liu Y S, Yu Z R, et al. Progress in spatial simulation of land use change; CLUE-S model and its application[J]. *Progress in Geography*, 2004, 23(4): 63-71.
- [28] 应兰兰, 侯西勇, 路 晓, 等. 我国非点源污染研究中输出系数问题[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6): 90-95, 99.
YING Lan-lan, HOU Xi-yong, LU Xiao, et al. Discussion on the export coefficient method in non-point source pollution studies in China[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2010, 21(6): 90-95, 99.
- [29] 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 574-581.
LONG Tian-yu, LIANG Chang-de, LI Ji-cheng, et al. Forecasting the pollution load of non-point sources imported to the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3): 574-581.
- [30] 梁常德, 龙天渝, 李继承, 等. 三峡库区非点源氮磷负荷研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 26-30.
LIANG Chang-de, LONG Tian-yu, LI Ji-cheng, et al. Importation loads of non-point source nitrogen and phosphorus in the Three Gorges Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 26-30.
- [31] 丁晓雯, 刘瑞民, 沈珍瑶. 基于水文水质资料的非点源输出系数模型参数确定方法及其应用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2006, 42(5): 534-538.
DING Xiao-wen, LIU Rui-min, SHEN Zhen-yao. Method for obtaining parameters of export coefficient model using hydrology and water quality data and its application[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2006, 42(5): 534-538.
- [32] 吴 磊. 三峡库区小江流域非点源污染负荷模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
WU Lei. Study on the simulation of non-point source pollution load in Xiaojiang river basin in the Three Gorges Reservoir area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [33] 刘腊美, 龙天渝, 李崇明, 等. 嘉陵江流域非点源溶解态氮污染负荷模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 808-813.
LIU La-mei, LONG Tian-yu, LI Chong-ming, et al. Simulation of dissolved nitrogen load in Jialing River basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4): 808-813.
- [34] 郝俊萍. 三峡库区典型小流域非点源污染模拟研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
HAO Jun-ping. The simulation of non-point source pollution of typical small watershed in the Three Gorges Reservoir area[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.