

文章编号:1671-6833(2025)02-0135-08

河南省非确定性土地利用优化规划研究

周 科

(华北水利水电大学,河南 郑州 450011)

摘 要:以土地利用适宜性为基础,研究了非确定性影响下土地利用优化格局。将地理信息系统(GIS)与区间概率规划(IPP)技术相结合,构建区间概率非确定性土地利用规划管理(IPP-LUPM)模型。首先,基于GIS数据,进行土地利用适宜性评价。其次,以不同类型土地利用最大面积和各类约束条件为输入,用IPP-LUPM模型优化土地利用面积,得出非确定性条件下土地利用优化方案和效益。以河南省为例,计算结果表明:当土地利用适宜性 $i=1$,非确定性概率 $p=0.01$ 水平时,土地利用效益为[4.78, 5.55]万亿元;当 $i=1, p=0.5$ 水平时,土地利用效益为[9.66, 10.44]万亿元。适宜性条件越好,土地利用效益越高,但同时带来的生态环境风险也相应偏大。构建的模型方法可为解决非确定性条件下土地利用优化方案提供有效途径,对于土地利用格局和管理方案优化分析具有重要的参考价值。

关键词:土地利用;非确定性;适宜性评价;区间概率模型;规划管理

中图分类号:F301.24

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2025.02.014

在资源管理和决策过程中,存在大量非确定性因子(灰色因子),其复杂性和非确定性使得相关问题很难用常规的确定性优化方法求解^[1-2]。近年来研究人员提出了非精确优化方法来处理非确定性问题,包括模糊规划法(FPM)、随机规划法(SPM)以及区间规划法(ILP)^[3-4]。这些方法广泛应用于多个领域^[5-6]。但是,非精确方法有其局限性,有时误差很大。因此,将非精确方法与精确方法相结合来处理土地利用中的非确定性问题,是近年来研究的一个热点。

近年来,随着气候变化、土地利用变化、社会经济发展及生态环境保护的需要,土地利用优化问题越来越得到国家和权威机构的关注^[7-8]。对于决策者和研究人员,土地利用的非确定性问题是一个棘手的问题^[9]。自然过程的随机特征、模型参数的估计、系统目标和约束条件的模糊性等都有可能面临大量的非确定性问题^[10]。许多研究人员利用非精确的方法来处理土地利用中的非确定性问题。Wang等^[11]提出了多目标线性规划模型并用于土地利用结构优化和调整。Battese等^[12]将多目标区间随机土地资源分配模型(MOISLAM)应用于非确定性条件下城市土地资源分配战略识别。李辉等^[13]

将区间规划法(ILP)与模糊柔性规划(FFP)相结合,用于国家土地系统优化。研究人员^[11-13]认为模糊演化算法在处理大规模全局优化问题中的决策变量完全可分或者完全不可分的问题时,精确的分组方法并不能保证提高算法性能,甚至可能会导致性能下降。

毋庸置疑,上述优化模型用于土地利用配置,可以得出近似准确的优化方案。遗憾的是,这种非确定性的优化模型在以往研究中缺乏有效的土地适宜性评价。实际上,土地利用适宜性的定位与分析是针对现有客观条件开展农事活动、科学规划的基本内容^[14]。过去几十年来,多目标决策分析和地理信息系统(GIS)技术越来越多地应用于土地利用与规划管理。土地利用适宜性分析应当成为优化模型的一个基础约束^[15],这有助于决策人员制定非确定性条件下的土地资源配置优化方案。

实践证明,将区间概率规划方法与GIS技术相结合,可以更好地描述土地资源配置系统中各复杂因素之间的交互作用,解决非确定性问题,提高系统的可靠性。本文的主要研究目标是开发基于GIS的区间概率规划土地利用与管理(IPP-LUPM)模

收稿日期:2024-10-16;修订日期:2024-12-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50579020)

作者简介:周科(1982—),男,河南封丘人,华北水利水电大学副教授,博士,主要从事土地生态规划和景观规划研究,E-mail:zhouke828282@163.com。

引用本文:周科. 河南省非确定性土地利用优化规划研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2025,46(2):135-142. (ZHOU K. Study on uncertainty land use optimization and planning in Henan Province[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science),2025,46(2):135-142.)

型,并应用于河南省土地优化利用规划与管理。

1 材料与方法

1.1 资料收集

(1)土地利用数据来自中国科学院土地利用和植被变化数据库和美国卫星影像遥感可视化解析和量化成果^[16-17]。

(2)地形属性即地形坡度和坡面层变化。根据30 m分辨率、等高线、数字高程模型(DEM)等资料从美国宇航局陆地过程分布式档案中心免费下载客户终端获取。

(3)地面地质、土层厚度和水文资料来自河南省水文地质工程调查总队。

(4)地面交通资料来自河南省交通厅。

(5)社会经济资料来自河南省各地级市的地方政府部门和河南省统计年鉴^[18-19]。

1.2 研究方法

1.2.1 基于GIS的IPP-LUPM模型构建

构建的IPP-LUPM模型框架如图1所示,包括4个模块。

(1)数据收集存储管理系统。包括资料获取、存储、资料提取、资料策划与分析。

(2)基于GIS的土地适宜性评价模块。

(3)线性规划模型分析为IPP-LUPM模型奠定

基础。

(4)基于GIS的土地利用规划管理区间概率IPP-LUPM模型。

本文提出的IPP-LUPM模型可有效反映土地利用配置问题的交互作用、复杂性、动态性和非确定性特征。在设定的目标和约束条件下,模型运行计算可以获得土地利用配置优化方案。

1.2.2 适宜性评价因子选择

(1)土地适宜性评价因子选择原则。①针对性原则。针对某种特定的用途和利用方式,即评价对象,选择土地适宜性评价因子。②选择性原则。根据各地实际需要,选定评价对象和划定评价范围,对应选择评价因子。③持续利用原则。经评定的土地用途在该种土地用途和利用方式下,土地可以实现持续利用,不会产生土地退化,也不会给邻近土地造成不良影响。④潜在适宜性原则。不仅要评定某一土地单元在目前状态下对某种土地用途和利用方式的适宜性,还要评定土地在未来时期内潜在的适宜性。

(2)土地适宜性分级标准。按照土地适宜程度划定土地适宜性,本文将土地适宜性分为五级,并从100到0赋分。

1.2.3 权重

权重的计算方法^[20-21]有很多。评价结果基本

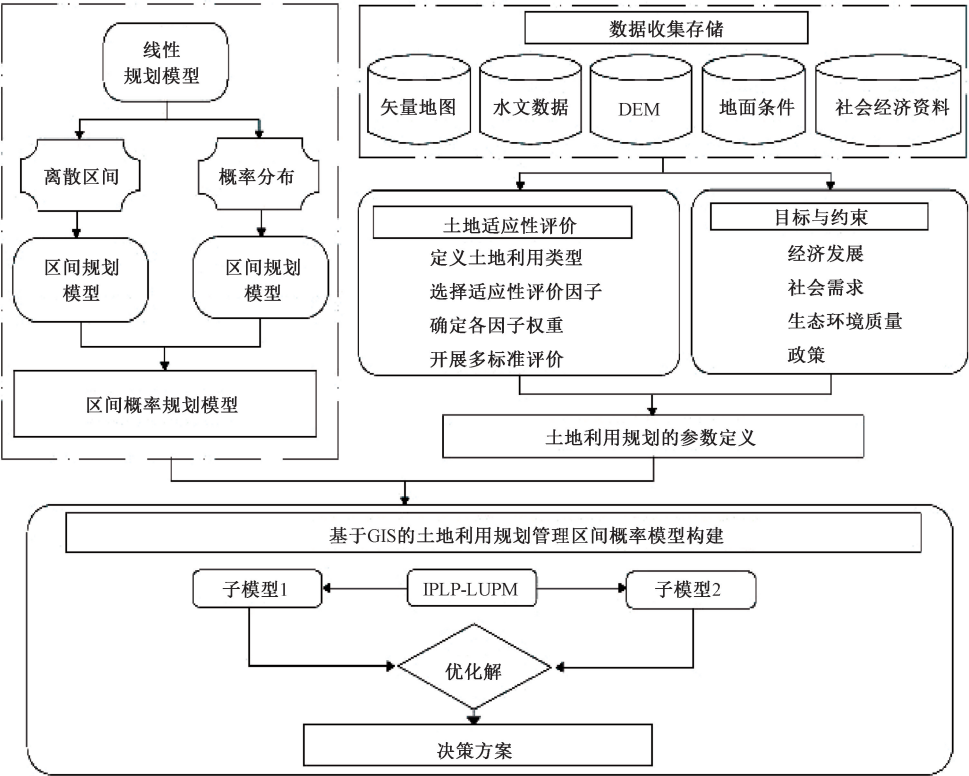


图1 IPP-LUPM模型框架图

Figure 1 Framework of IPP-LUPM model

取决于评价者的看法和优先事项。德尔菲调查技术 (DST) 是一个非常灵活的方法。本文应用 DST 法, 选择了 15 个相互独立的专家, 开展调查, 对每一个因子赋值。取其平均值作为各类因子的最终权重。土地利用适宜性评价因子与权重如表 1 所示。

1.2.4 适宜性评价

各类因子的组合可采用式(1)计算:

$$S_j = \sum_{i=1}^n W_{ij} X_{ij} \circ \tag{1}$$

式中: S_j 为土地利用类型 j 的适宜性级别; n 为与土地利用类型 j 有关的标准总数; W_{ij} 为类型 j 、适宜性标准为 i 的权重; X_{ij} 为类型 j 、适宜性标准为 i 的变量。对于每一个适宜性级别计算结果, 本文从小到大划分为 5 个区间。即: 高度适宜性 (100~>90); 中度适宜性 (90~>80); 弱适宜性 (80~>60); 暂适宜性 (60~>30); 永久不适宜性 (≤ 30)。

2 实例研究

2.1 概况

河南省地跨黄河、淮河、海河和长江流域, 土地总面积为 $1.67 \times 10^5 \text{ km}^2$, 境内有大别山、桐柏山、伏牛山、太行山 4 大山脉。多年平均降水量自北向南由 600 mm 递增至 1 200 mm。属于半湿润半干旱气

候。省内降水分布不均, 水资源匮乏。多年平均水资源总量 $699.95 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中地表水资源 $475.9 \times 10^8 \text{ m}^3$, 浅层地下水资源 $281.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。耕地平均占有水资源 $4\,191.4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。2019 年河南省总人口为 10 952 万人, 人口密度为 661.8 人/ km^2 , 人均土地资源量仅为 0.15 hm^2 。河南省耕地面积利用现状如表 2 所示。

河南省土地利用存在的问题: 一是土地供需矛盾突出; 二是土地开发的后备资源不足, 多年来由于农业结构调整、自然灾害损毁和非农业建设占地等影响, 土地资源大量减少; 三是城镇化进程加快, 用地需求增大; 四是区域统筹不够, 土地利用效率较低; 五是生态环境恶化, 土地过度开发, 土地质量退化, 可持续发展水平降低^[22]。因此, 针对河南省土地利用现状, 基于 GIS 和 IPP-LUPM 模型, 开展土地利用的适宜性评价, 制定土地利用优化方案是非常必要的。

2.2 河南省 IPP-LUPM 模型开发

2.2.1 目标函数

$$\text{Max } f(x)^{\pm} = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 (CP_{ij}^{\pm} \cdot x_{ij}^{\pm}) + \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 (CP_{i,k}^{\pm} \cdot x_{i,k}^{\pm}) \tag{2}$$

式中: \pm 表示区间值; $f(x)^{\pm}$ 为规划水平的土地利用效

表 1 土地利用适宜性评价因子与权重
Table 1 Suitability factors for land-use and the weights

土地类型	一级指标	二级指标 (权重)	S_1 (100~>90)	S_2 (90~>80)	S_3 (80~>60)	S_4 (60~>30)	$S_5 \leq 30$
耕地	地形	坡度(0.6)	<1°(100)	1°~<2°(90)	2°~<5°(80)	5°~≤15°(40)	>15°(0)
		高程 m(0.4)	<30(90)	30~<50(80)	50~<100(70)	100~≤200(50)	>200(10)
	地面条件	地质类型(0.5)	改良土(95)	水浇地(>85)	半浇地(70)	旱地(30)	湖泊河流(5)
		土壤厚度 cm(0.5)	>80(90)	80~>50(70)	50~>30(70)	30~≥15(50)	<15(30)
	地质灾害	地表侵蚀(0.5)	无侵蚀(100)	片蚀(80)	滑坡(70)	沟壑(35)	深沟(20)
		与断层距离 m(0.5)	>300(100)	300~>100(90)	100~>50(60)	50~≥30(30)	<30(10)
	水文条件	地下水埋深 m(0.4)	>50(90)	50~>30(85)	30~>20(70)	20~≥10(40)	<10(20)
		地表径流 mm(0.6)	>800(100)	800~>700(85)	700~>600(70)	600~≥400(50)	<400(20)
工业居住	地形	地面坡度(0.8)	<1°(100)	1°~<2°(90)	2°~<5°(60)	5°~≤15°(30)	>15°(0)
		地面高程 m(0.2)	<30(90)	30~<50(80)	50~<100(60)	100~≤200(50)	>200(20)
	地面条件	地质类型(0.4)	填土类(100)	水田(85)	半水田(70)	旱地(30)	河湖(5)
		利用中(0.6)	建设(100)	耕地(90)	荒地(60)	水面(40)	林地(30)
	地质灾害性	水土流失(0.5)	无(100)	片蚀(80)	滑坡(70)	沟壑(35)	深沟(20)
		距离断层 m(0.5)	>300(100)	300~>100(90)	100~>50(60)	50~≥30(30)	<30(10)
	空间位置	距离主干路 m(0.6)	<100(95)	100~<300(85)	300~<800(70)	800~≤1 500(40)	>1 500(10)
		距 CBD(min)(0.4)	<5(100)	5~<10(90)	10~<30(80)	30~≤60(50)	>60(20)

注: $S_1 \sim S_5$ 所对应的列中括号内为适宜性评价因子。

表 2 河南省耕地利用现状统计表
Table 2 Land use status of Henan Province

总面积	耕地面积		林地	水田 水域	果园	草地	其他用地	未利用地
	旱地	灌溉						
1 669.96	416.36	394.77	282.90	56.91	31.16	1.47	272.59	213.8
占比/%	48.57		16.94	3.41	1.87	0.09	16.32	12.8

益,元; i 为土地利用适宜度, $i=1$ 为高度适宜, $i=2$ 为中度适宜, $i=3$ 为弱适宜, $i=4$ 为暂时适宜, $i=5$ 为永不适宜; j 为经济型土地利用类型, $j=1$ 商业用地, hm^2 , $j=2$ 为居民住宅用地, hm^2 ; $j=3$ 工业用地, hm^2 ; k 为非经济型土地利用类型, $k=1$ 为耕地, hm^2 , $k=2$ 为林地, hm^2 , $k=3$ 为水田, hm^2 , $k=4$ 为果园, hm^2 , $k=5$ 为草地, hm^2 , $k=6$ 为其他用地, hm^2 , $k=7$ 为未利用地, hm^2 ; $CP_{i,j}^+$ 为经济型土地利用的单位效益,元/ hm^2 ; $CP_{i,k}^+$ 为非经济型土地利用的单位效益,元/ hm^2 ; $x_{i,j}^+$ 适宜度为 i 的 j 类用地区间变量, hm^2 ; $x_{i,k}^+$ 适宜度为 i 的 k 类用地区间变量, hm^2 。

2.2.2 约束条件

(1)投资约束:

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 (CN_{i,k}^+ \cdot x_{i,k}^+) + TI^+ - TO^+ \geqslant TD^+。 \quad (3)$$

式中: $CN_{i,k}^+$ 为非经济型土地利用单位费用,元;
 $\sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 (CN_{i,k}^+ \cdot x_{i,k}^+)$ 为非经济型土地利用总直接费用,元; TI^+ 政府对非经济型土地利用的投入,元; TO^+ 为非经济型土地利用产出,元; TD^+ 为非经济型土地利用收益目标,元。

(2)农耕地投入产出约束:

$$\sum_{i=1}^5 (YPU_i^+ \cdot x_{i,k=1}^+) - YI^+ \geqslant YD^+。 \quad (4)$$

式中: YPU_i^+ 为农耕地的单位产出, t/hm^2 ; YI^+ 为农耕地生产投入, t ; YD^+ 为耕地目标产量, t ; $x_{i,k=1}^+$ 为农耕地数量, hm^2 。

(3)水分生产率约束:

$$\sum_{k=1}^6 WPU_k^+ - WI^+ \geqslant WD^+。 \quad (5)$$

式中: WPU_k^+ 为灌溉土地单位水分产量, kg/m^3 ; WI^+ 为灌溉土地单位耗水量成本, kg/m^3 ; WD^+ 为水分生产率目标, kg/m^3 。

(4)可利用水量约束:

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 (WC_i^+ \cdot x_{i,j}^+) + \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 (WC_i^+ \cdot x_{i,k}^+) \leqslant AW^+。 \quad (6)$$

式中: WC_i^+ 为土地利用 j 或 k 上的单位耗水量, t/hm^2 ; AW^+ 为可利用水量, m^3 。

(5)可利用能耗约束:

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 (EC_i^+ \cdot x_{i,j}^+) + \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 (EC_i^+ \cdot x_{i,k}^+) \leqslant AE^+。 \quad (7)$$

式中: EC_i^+ 为土地利用 j 或 k 上的单位耗能, kWh/hm^2 ; AE^+ 为可利用能源, kWh 。

(6)单位土地面积上最多人口:

$$TP^+ / (\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 x_{i,j}^+ + \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 x_{i,k}^+) \leqslant MIP^+。 \quad (8)$$

式中: TP^+ 为总人口; MIP^+ 为单位土地面积 j 或 k 上的最多人口,人/ hm^2 。

(7)可利用劳动力约束:

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 (LC_i^+ \cdot x_{i,j}^+) + \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 (LC_i^+ \cdot x_{i,k}^+) \leqslant AL^+。 \quad (9)$$

式中: LC_i^+ 为土地利用 j 或 k 上的单位面积平均劳动力,人/ hm^2 ; AL^+ 为可利用劳动力。

(8)经济型土地利用适宜性约束:

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 x_{i,j}^+ \leqslant MIL_j^+。 \quad (10)$$

(9)非经济型土地利用适宜性约束:

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 x_{i,k}^+ \leqslant MIL_k^+。 \quad (11)$$

式中: MIL_j^+ 为经济型土地利用 j 类最大面积, hm^2 ; MIL_k^+ 为非经济型土地利用 k 类最大面积, hm^2 。适宜度最高的面积可以确定为最大面积。

(10)污水处理能力约束:

$$\sum_{i=1}^5 (CWC_{i,j=1}^+ \cdot x_{i,j=1}^+) + \sum_{i=1}^5 (RWC_{i,j=2}^+ \cdot x_{i,j=2}^+) + \sum_{i=1}^5 (IWC_{i,j=3}^+ \cdot x_{i,j=3}^+) + \sum_{i=1}^5 (AWC_{i,k=1}^+ \cdot x_{i,k=1}^+) \leqslant AWD^p。 \quad (12)$$

式中: $CWC_{i,j=1}^+$ 为商业用地污水排放系数, t/hm^2 ; $RWC_{i,j=2}^+$ 为居民住宅用地污水排放系数, t/hm^2 ; $IWC_{i,j=3}^+$ 为工业用地污水排放系数, t/hm^2 ; $AWC_{i,k=1}^+$ 为耕地污水排放系数, t/hm^2 ; AWD 为污水处理能力, t ; p 为偏离环境容量约束条件的概率, p 的取值为 $[0,1]$ 。

(11)固体废物处理能力约束:

$$\sum_{i=1}^5 (CSC_{i,j=1}^{\pm} \cdot x_{i,j=1}^{\pm}) + \sum_{i=1}^5 (RSC_{i,j=2}^{\pm} \cdot x_{i,j=2}^{\pm}) + \sum_{i=1}^5 (ISC_{i,j=3}^{\pm} \cdot x_{i,j=3}^{\pm}) + \sum_{i=1}^5 (ASC_{i,k=1}^{\pm} \cdot x_{i,k=1}^{\pm}) \leq ASD^p. \quad (13)$$

式中： $CSC_{i,j=1}^{\pm}$ 为商业用地固体废物排放系数， t/hm^2 ； $RSC_{i,j=2}^{\pm}$ 为居民住宅用地固体废物排放系数， t/hm^2 ； $ISC_{i,j=3}^{\pm}$ 为工业用地固体废物排放系数， t/hm^2 ； $ASC_{i,k=1}^{\pm}$ 为耕地固体废物排放系数， t/hm^2 ； ASD 为固体废物处理能力， t 。

(12) 水土流失约束：

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 (OC_i^{\pm} \cdot x_{i,j}^{\pm}) + \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 (OC_i^{\pm} \cdot x_{i,k}^{\pm}) \leq AO^{\pm}. \quad (14)$$

式中： OC_i^{\pm} 为土地利用 j 或 k 上的水土流失面积比， $\%$ ； AO^{\pm} 为水土流失控制目标， km^2 。

(13) 林地约束：

$$(\sum_{i=1}^5 x_{k=2}^{\pm}) / ((\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 x_{i,j}^{\pm}) + (\sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 x_{i,k}^{\pm})) \geq MFR^{\pm}. \quad (15)$$

式中： MFR^{\pm} 为最小林地植被率， $\%$ 。

(14) 化肥用量约束：

$$\sum_{i=1}^5 (FP_i^{\pm} \cdot x_{k=1}^{\pm}) / (\sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 x_{i,k}^{\pm}) \leq MFP^{\pm}. \quad (16)$$

式中： FP_i^{\pm} 为单位耕地面积化肥施用量， t/hm^2 ； MFP^{\pm} 为最大允许化肥施用量， t/hm^2 。

(15) 土地总面积约束：

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 x_{i,j}^{\pm} + \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^7 x_{i,k}^{\pm} = TUL^{\pm}. \quad (17)$$

式中： TUL^{\pm} 为土地总面积， hm^2 。

(16) 非负约束：

$$\begin{cases} x_{i,j}^{\pm} \geq 0; \\ x_{i,k}^{\pm} \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

上述 IPP-LUPM 模型可以通过计算两个线性模型得出优化结果，模型中的有关参数见表 3。

3 讨论与分析

3.1 土地利用类型和系统效益关系分析

根据本文构建的 IPP-LUPM 模型，当 $i=1$ ，不同 p 水平时，可以得出 2020 年河南省土地利用格局和不同 p 水平条件下土地利用效益（表 4）。当 $i=2, 3, 4, 5$ 时，计算方法相同。由表 4 可知，决策变量 $x_{i,j}^{\pm}$ 和决策变量 $x_{i,k}^{\pm}$ 的下限对应的效益较小，这时，社会需求完全得到满足，可以确保生态平衡和环境标准的要求，属于保守型土地利用策略。当决策变量 $x_{i,j}^{\pm}$ 和决策变量 $x_{i,k}^{\pm}$ 为上限时，土地利用将获得较高的经济效益。但是，生态环境风险提高，属于激进型策略。例如，当 $p=0.01$ ， $f(x)^{\pm}$ 的优化解为 $[4.78, 5.55]$ 万亿元。土地利用效益在 4.78 万亿元和 5.55 万亿元之间，每一个连续变量的实际值在其上下边界之间变动。一般而言，较低的土地利用效益对应的偏离风险也小。较高的效益对应的偏离风险也大。

表 3 经济、社会、环境和技术参数 ($i=1$)

Table 3 Economic, social, environmental, and technical parameters ($i=1$)

参数	取值	参数	取值
$TUL^{\pm}/10^4 \text{ hm}^2$	[1 456.2, 1 669.96]	$WC_i^{\pm}/(m^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	[1 462.5, 2 025.0]
$TP^{\pm}/10^4 \text{ 人}$	[10 952, 12 047]	$AW^{\pm}/10^8 \text{ m}^3$	[204.87, 279.98]
$MIP^{\pm}/(\text{人} \cdot \text{hm}^{-2})$	[655.8, 752.1]	$EC_i^{\pm}/(10^6 \text{ kwh} \cdot \text{km}^{-2})$	[3.12, 4.56]
$TI^{\pm}/10^9 \text{ 元}$	[885.09, 1 014.5]	$AE^{\pm}/10^8 \text{ kwh}$	[5 155.0, 6 138.0]
$TO^{\pm}/10^9 \text{ 元}$	[5 952.6, 6 822.2]	$OC_i^{\pm}/\%$	[3.0, 4.0]
$TD^{\pm}/10^9 \text{ 元}$	[6 875.0, 8 704.0]	AO^{\pm}/km^2	[4 441.3, 5 287.7]
$YPU_i^{\pm}/(t \cdot \text{hm}^{-2})$	[12.06, 13.27]	$CWC_{i,j=1}^{\pm}/(10^4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$	[760.0, 1 028.0]
$YI^{\pm}/10^3 \text{ t}$	[1 470.0, 7 490.0]	$IWC_{i,j=3}^{\pm}/(10^4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$	[1 039.0, 1 405.0]
$YO^{\pm}/10^4 \text{ t}$	[9 780.6, 10 758.6]	$AWC_{i,k=1}^{\pm}/(10^4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$	[1 091.3, 1 476.5]
$YD^{\pm}/10^4 \text{ t}$	[19 560, 21 516]	$RWC_{i,j=2}^{\pm}/(10^4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2})$	[311.0, 421.0]
$WPU_i^{\pm}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	[1.20, 1.82]	$CSC_{i,j=1}^{\pm}/(t \cdot \text{hm}^{-2})$	[0.54, 0.73]
$WI^{\pm}/(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	[0.22, 0.43]	$ISC_{i,j=3}^{\pm}/(t \cdot \text{hm}^{-2})$	[734.0, 994.3]
$WD^{\pm}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	[1.50, 2.15]	$ASC_{i,k=1}^{\pm}/(t \cdot \text{hm}^{-2})$	[7.72, 10.44]
$LC_i^{\pm}/(\text{人} \cdot \text{hm}^{-2})$	[403, 456]	$RSC_{i,j=2}^{\pm}/(t \cdot \text{hm}^{-2})$	[220.1, 297.8]
$AL^{\pm}/10^4 \text{ 人}$	[1 774.5, 2 400.9]	$MFP^{\pm}/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	[30.0, 40.0]

表 4 $i=1$ 时不同 p 水平土地利用优化布局方案与经济效益

Table 4 Optimized land-use patterns and benefits under different p levels

土地利 用类型	$P=0.01$		$P=0.10$		$P=0.20$		$P=0.30$		$P=0.50$	
	F	B	F	B	F	B	F	B	F	B
$j=1$	[6 863,6 980]	[0.93,1.14]	[7 320,7 350]	[1.03,1.06]	[7 778,7 809]	[1.18,1.31]	[8 235,9 181]	[1.26,1.36]	[9 150,9 187]	[1.44,1.55]
$j=2$	[7 987,8 059]	[0.80,0.96]	[8 520,8 380]	[1.15,1.21]	[9 053,9 133]	[1.40,1.53]	[9 585,10 583]	[1.54,1.62]	[10 650,10 745]	[1.66,1.75]
$j=3$	[690,710]	[0.09,0.11]	[736,752]	[0.10,0.11]	[782,799]	[0.13,0.15]	[828,846]	[0.25,0.29]	[920,940]	[0.31,0.32]
$k=1$	[81 126,81 973]	[1.09,1.19]	[81 156,89 271]	[1.29,1.40]	[81 561,88 343]	[1.47,1.60]	[82 376,85 022]	[1.74,1.81]	[81 156,81 993]	[1.89,2.10]
$k=2$	[26 550,27 015]	[0.57,0.63]	[26 567,29 223]	[0.69,0.87]	[26 699,29 369]	[0.91,1.29]	[23 910,26 145]	[1.39,1.41]	[26 567,27 024]	[1.51,1.65]
$k=3$	[3 642,4 082]	[0.28,0.37]	[3 885,4 354]	[0.41,0.46]	[4 128,4 627]	[0.45,0.56]	[4 370,6 723]	[0.58,0.61]	[4 856,5 443]	[0.70,0.79]
$k=4$	[1 889,2 232]	[0.23,0.26]	[2 014,2 381]	[0.33,0.38]	[2 140,2 530]	[0.28,0.31]	[2 266,2 678]	[0.32,0.42]	[2 518,2 976]	[0.49,0.51]
$k=5$	[7 004,7 471]	[0.18,0.21]	[7 470,7 970]	[0.26,0.33]	[7 937,8 468]	[0.35,0.39]	[8 404, 9 422]	[0.41, 0.45]	[9 338,9 962]	[0.46,0.50]
$k=6$	[5 912,6 308]	[0.19,0.23]	[7 883,8 410]	[0.23,0.27]	[6 701,7 149]	[0.33,0.36]	[7 095,7 569]	[0.40,0.51]	[7 883,8 410]	[0.52,0.55]
$k=7$	[7 287, 22 168]	[0.42, 0.45]	[7 773,8 905]	[0.49,0.55]	[8 259,8 769]	[0.51,0.57]	[8 744,8 827]	[0.62,0.66]	[9 716,10 316]	[0.68,0.72]

注:表中 F 代表该水平下的土地利用优化布局方案,100 hm²; B 代表对应的土地利用系统经济效益,10 万亿元。

3.2 土地利用效益和生态环境约束关系分析

在 IPP-LUPM 模型中,社会条件约束是单位面积上最大人口和可利用劳动力。如果单位面积上最大人口数量改变,土地利用格局和效益也改变。单位面积上人口越多,可利用劳动力越多,土地利用效益也越大。就河南省来说,当单位面积最大人口为 13 人/hm² 时,可利用劳动力为 5.8 人/hm²,则土地资源利用效益为[5.6,6.2]万亿元;当单位面积最大人口为 14 人/hm² 时,可利用劳动力为 6.0 人/hm²,土地利用效益为[7.6,8.2]万亿元。必须通过社会条件与经济目标之间的相互博弈权衡做出决策。

3.3 土地利用效益与土地适宜性博弈分析

一般来说,土地利用效益随着 i 值的增加而增加,经济型的土地利用面积越大,效益也越大。也就是说,降低土地利用的适宜性,比单纯追求较高的土地利用适宜性得到的效益要大。但是,增加较低的适宜性土地面积,会导致较多的生态环境问题。应当通过经济目标-生态环境目标-确定性-安全性问题之间的博弈协调,获得最佳的土地利用方案。

4 结论

本文通过 GIS 技术和土地利用适宜性评价,构建了基于 GIS 的区间概率土地利用规划 (IPP-LUPM) 模型。该模型不仅考虑了土地利用适宜性评价,而且考虑了经济和生态环境因素,反映了土地利用中各类因素,也可以检验非确定性条件下的满意度或风险度。将构建的模型应用于河南省土地利用规划,结果表明,模型计算的决策方案集,有助于决策部门在非确定性条件下优化土地利用格局。与

以往优化模型对比,本文将土地利用适宜性分析纳入优化过程,土地利用适宜性分析能够有效地识别各种土地利用的合理空间格局,有助于实现土地利用的优化目标。IPP-LUPM 模型计算结果能够得出土地利用适宜性和土地利用效益之间的量化关系。基于高适宜性的土地利用方案可以减少生态环境系统中的潜在矛盾,但同时获得的经济效益也较小。较低的适宜性虽然可以获得较高的经济效益,但是也会带来较高的偏离生态环境约束的风险。本文构建的 IPP-LUPM 模型有助于科学合理地规划利用现有土地。这一方法同样适用于其他领域,如城市污染物处理系统、水资源优化配置、交通运输和工程管理运行以及水污染和水质控制等问题。

参考文献:

[1] 戴文远,江方奇,黄万里,等. 基于“三生空间”的土地利用功能转型及生态服务价值研究:以福州新区为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2098-2109.
DAI W Y, JIANG F Q, HUANG W L, et al. Study on transition of land use function and ecosystem service value based on the conception of production, living and ecological space: a case study of the Fuzhou New Area[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(12): 2098-2109.

[2] 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
FU B J. Ecosystem service and ecology safety[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.

[3] 刘永强,廖柳文,龙花楼,等. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析:以湖南省为例[J]. 地理研究, 2015, 34(4): 691-700.

- LIU Y Q, LIAO L W, LONG H L, et al. Effects of land use transitions on ecosystem services value: a case study of Hunan Province[J]. *Geographical Research*, 2015, 34(4): 691-700.
- [4] 欧阳晓, 贺清云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响: 以长株潭城市群为例[J]. *经济地理*, 2020, 40(1): 93-102.
- OUYANG X, HE Q Y, ZHU X. Simulation of impacts of urban agglomeration land use change on ecosystem services value under multi-scenarios: case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Economic Geography*, 2020, 40(1): 93-102.
- [5] LIN Q G, HUANG G H. IPEM: an interval-parameter energy systems planning model[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2008, 30(14/15): 1382-1399.
- [6] 吕立刚, 周生路, 周兵兵, 等. 区域发展过程中土地利用转型及其生态环境响应研究: 以江苏省为例[J]. *地理科学*, 2013, 33(12): 1442-1449.
- LU L G, ZHOU S L, ZHOU B B, et al. Land use transformation and its eco-environmental response in process of the regional development: a case study of Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(12): 1442-1449.
- [7] CALLESEN I. Biodiversity and ecosystem services in life-cycle impact assessment-inventory objects of impact categories[J]. *Ecosystem Services*, 2016, 22: 94-103.
- [8] WACKERNAGEL M, REES W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective[J]. *Ecological Economics*, 1997, 20(1): 3-24.
- [9] 肖长江, 欧名豪, 李鑫. 基于生态-经济比较优势视角的建设用地空间优化配置研究——以扬州市为例[J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 696-708.
- XIAO C J, OU M H, LI X. Research on spatial optimum allocation of construction land in an eco-economic comparative advantage perspective——a case study of Yangzhou City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 696-708.
- [10] 陈红, 史云扬, 柯新利, 等. 生态与经济协调目标下的郑州市土地利用空间优化配置[J]. *资源科学*, 2019, 41(4): 717-728.
- CHEN H, SHI Y Y, KE X L, et al. Spatial optimization of land use based on the objective of coordinated ecological protection and economic development in Zhengzhou City[J]. *Resources Science*, 2019, 41(4): 717-728.
- [11] WANG H R, GAO Y Y, LIU Q, et al. Land use allocation based on interval multi-objective linear programming model: a case study of pi County in Sichuan Province [J]. *Chinese Geographical Science*, 2010, 20(2): 176-183.
- [12] BATTESE G E, COELLI T J. Frontier production functions, technical efficiency and panel data: with application to paddy farmers in India[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 1992, 3(1): 153-169.
- [13] 李辉, 顾荣华, 朱玉林. 土地出让对长江中游城市群经济辐射的影响效应与形成机制研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(1): 35-43.
- LI H, GU R H, ZHU Y L. Effect of land transfer on the economic radiation of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River and its formation mechanism [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(1): 35-43.
- [14] 王良健, 李辉. 中国耕地利用效率及其影响因素的区域差异: 基于 281 个市的面板数据与随机前沿生产函数方法[J]. *地理研究*, 2014, 33(11): 1995-2004.
- WANG L J, LI H. Cultivated land use efficiency and the regional characteristics of its influencing factors in China: by using a panel data of 281 prefectural cities and the stochastic frontier production function[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(11): 1995-2004.
- [15] 顾荣华, 朱玉林. 区域土地利用对国土空间生态优化的影响机理及实证研究: 以江苏省为例[J]. *经济地理*, 2021, 41(11): 201-208.
- GU R H, ZHU Y L. Impact mechanism of regional land use on the ecological optimization: a case study of Jiangsu Province[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(11): 201-208.
- [16] 年福华, 姚士谋. 城市建设过程中节约用地途径探讨[J]. *地域研究与开发*, 2002, 21(1): 18-21.
- NIAN F H, YAO S M. Ways of land use in the process of urban development in China[J]. *Areal Research and Development*, 2002, 21(1): 18-21.
- [17] 冯光. 关于河南省土地资源可持续利用问题的思考[J]. *资源·产业*, 2000, 2(11): 44-46.
- FENG G. Thoughts on the sustainable utilization of land resources in Henan Province [J]. *Resources & Industries*, 2000, 2(11): 44-46.
- [18] 吴荣涛, 蔡慧敏. 河南省土地资源可持续利用路径分析[J]. *河南农业科学*, 2007, 36(3): 77-81.
- WU R T, CAI H M. Path analysis of sustainable use of land resources in Henan[J]. *Journal of Henan Agriculture*

tural Sciences, 2007, 36(3): 77-81.

[19] 史晨璐, 吴秀芹. 喀斯特断陷盆地土地利用对生态系统生产力的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 341-351.

SHI C L, WU X Q. Impact of land use on ecosystem productivity in Karst faulted basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(2): 341-351.

[20] 王良健, 李辉, 石川. 中国城市土地利用效率及其溢出效应与影响因素[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1788-1799.

WANG L J, LI H, SHI C. Urban land-use efficiency, spatial spillover, and determinants in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1788-1799.

[21] 黄贤金, 曹大贵. 南京江北新区储备土地效益提升的政策建议[J]. 土地经济研究, 2015(2): 23-51.

HUANG X J, CAO D G. Policy suggestions on improving the land reserve benefit in Nanjing Jiangbei New Area[J]. Research on land economy, 2015(2): 23-51.

[22] 张泊平, 吴国玺, 李荷香. 河南省土地资源利用现状与可持续利用模式研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(24): 10610-10611.

ZHANG B P, WU G X, LI H X. Study on the current status and sustainable utilization models of land resources in Henan Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(24): 10610-10611.

Study on Uncertainty Land Use Optimization and Planning in Henan Province

ZHOU Ke

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: The land use pattern with uncertainty influences was deeply studied based on land use suitability. The geographic information system (GIS) and interval probability planning (IPP) technology was combined to build a land use planning management (IPP-LUPM) model. Firstly, land use suitability evaluation was carried out based on GIS data. Secondly, taking the maximum area of different land use types and the constraints as input, the IPP-LUPM model was used to optimize land use area and to obtain land use optimum schemes with uncertainties. Taking Henan Province as an example, it was shown by the study results that when the land use suitability $i=1$, uncertainty probability $p=0.01$ level, [4.78, 5.55] trillion Yuan could be obtained for the land use benefit, when $i=1$, $p=0.5$, [9.66, 10.44] trillion Yuan could be obtained for the land use benefit. The greater the suitability level, the higher the land proposed benefit could be, and the greater the ecological environmental risks would be. It was shown by the results that the model could provide an effective way to solve the land use optimization under uncertainty conditions. It was of important reference value to optimize the land use pattern and management scheme.

Keywords: land use; uncertainties; suitability evaluation; interval probabilistic model; planning and management