

# 基于生态-经济权衡的京津冀城市群 土地利用优化配置

马冰滢<sup>1</sup>, 黄 姣<sup>2,3</sup>, 李双成<sup>2,3\*</sup>

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 广东 深圳 518055; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;  
3. 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘 要:**探索生态保护与经济发展的权衡关系,并利用该权衡关系协调土地利用优化配置是解决城市群经济与生态协调发展难题的重要途径,已成为目前的一个研究热点。论文针对京津冀城市群生态友好型协同发展的需求,设置生态系统服务价值最大化和经济价值最大化2种优化目标,每种目标下再设置“生态保护”“统筹兼顾”“粮食安全”和“经济发展”4种土地利用情景,采用CLUE-S模型模拟2025年京津冀城市群在不同情景下的土地利用空间配置格局,及其生态系统服务价值、经济价值在不同目标的各种情景下的变化。研究结果表明:相比2015年,2025年在不同目标不同情景下,各类土地利用面积的数量变化和空间格局均有较大不同,且生态目标和经济目标下不同情景的土地利用配置不同。生态系统服务价值在生态目标生态保护情景下最大,为14423.58亿元;而经济价值则在经济目标经济发展情景下最大,为96771.49亿元。从土地利用变化的空间分布上来看,生态用地中林地与草地的增加多出现在坝上高原和燕山与太行山山地,水体的增加则主要分布在东部沿海地区。研究认为,生态效益与经济效益间存在权衡关系,基于生态-经济权衡的土地利用优化研究结果对未来京津冀城市群生态实践工作有较大的参考价值。

**关键词:**生态-经济权衡;土地利用优化配置;CLUE-S模型;京津冀城市群

土地为人类提供多种产品或服务,不同的土地利用方式深刻影响着土地的结构和功能(刘超等, 2016)。近年来,快速城市化地区由于过度追求经济效益,导致建设用地急剧扩张,土地利用结构失衡,土地质量下降,严重影响到土地生态系统向人类提供气候调节、土壤保持、景观等生态系统服务的能力,继而威胁到区域的可持续发展(叶浩等, 2010; Blumstein et al, 2015)。生态效益与经济效益的权衡与协调成为土地利用优化配置的热点与难点。

土地利用优化配置往往通过设置主导目标和约束条件来调整不同土地利用类型的数量和空间

布局,以实现不同效益需求的兼顾。目前尝试兼顾生态和经济效益的土地利用优化配置研究主要有3种思路,其中最为传统的是以经济效益最大化作为主导目标,以生态用地面积的保有量(张佳会等, 2001; 陈卓等, 2013)、森林覆盖率(王月健等, 2010)或生态系统服务价值的数量(刘静怡等, 2013; 赵阳等, 2014)作为约束条件,采用线性规划模型得到最优的土地利用数量结构,再用CLUE-S模型实现土地利用的空间配置。另一种是以最大化生态系统服务总价值为主导目标,以经济效益作为约束条件,采用混合蛙跳算法(郭小燕等, 2016)或多目标线

收稿日期:2018-02-01;修订日期:2018-08-09。

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项(201511010-3B)。[Foundation: Special Fund for Public Welfare Research of Ministry of Land and Resources of China, No. 201511010-3B.]

第一作者简介:马冰滢(1994—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要从事生态系统服务与土地利用优化研究。E-mail: 1501213790@pku.edu.cn

\*通信作者简介:李双成(1961—),男,河北平山人,教授,博士生导师,主要从事地表格局与过程复杂性计算和模拟研究。E-mail: scl@urban.pku.edu.cn

引用格式:马冰滢,黄姣,李双成. 2019. 基于生态-经济权衡的京津冀城市群土地利用优化配置[J]. 地理科学进展, 38(1): 26-37. [Ma B Y, Huang J, Li S C. 2019. Optimal allocation of land use types in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on ecological and economic benefits trade-offs. Progress in Geography, 38(1): 26-37.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.01.003

性规划(包蕊等, 2018)等方法来优化土地利用的数量结构和空间布局。第3种思路是同时将经济效益和生态系统服务价值量的最大化作为目标, 采用多智能体模型(张鸿辉等, 2011)、多目标规划及决策偏好(李天猜等, 2016)和非线性优化模型中的理想点法(龚建周等, 2010; 许小亮等, 2016)等寻找土地利用配置的最优方案。

单独将经济效益或生态效益的最大化作为主导目标的土地利用优化配置体现了在兼顾2种效益的基础上分别对经济效益和生态效益的侧重。城市群地区是国家经济发展的战略核心区, 又是国家新型城镇化的主体区, 对生态环境提出了非常高的要求(方创琳等, 2016)。除经济目标主导外, 生态目标主导逐渐成为某些区域采取的土地利用调控策略, 如各种生态涵养区。比较2种策略下土地利用优化配置的结果对于新形势下城市群土地利用政策的制定具有积极意义。本文以京津冀城市群为案例, 基于线性规划和CLUE-S模型相结合的方法, 比较了研究区在“生态保护”“统筹兼顾”“粮食安全”和“经济发展”4种土地利用情景下, 分别以经济效益最大化和生态系统服务价值最大化为主导目标(以下分别简称为经济目标和生态目标)的2025年土地利用空间配置格局, 以及相应的经济效益和生态系统服务总价值的大小, 讨论了适合研究区的土地利用决策, 研究结果能够对未来京津冀城市群生态实践工作有较大的参考价值。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区域概况

京津冀城市群(113°27'E~119°53'E、36°03'N~42°37'N)是中国3个主要城市群之一。包括北京、天津2个直辖市和河北省11个地级市, 总面积217146.42 km<sup>2</sup>。研究区为暖温带大陆性季风气候, 降水较多且集中在夏季, 夏天炎热、冬天寒冷, 气温年较差较大。区域内地形平坦, 以平原为主, 河流较多, 西部太行山地区生态资源丰富, 是主要的生态系统服务供给区, 而中部的北京市和天津市人口密集, 是生态系统服务的主要消费区, 区域内土地类型多种多样且具有明显的多极化特质(刘金龙等, 2013; 马程等, 2013; 李双成等, 2014)。

### 1.2 数据来源

本文使用了中国科学院资源环境科学数据中

心的2000、2005、2010、2015年4期京津冀土地利用30 m×30 m栅格数据, 并将其中22种土地利用类型归并为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地6类, 再重采样至1 km×1 km分辨率。其他空间数据主要包括: 2015年Landsat人口密度1 km×1 km栅格数据, 地理空间数据云平台的DEM 30 m×30 m栅格数据, 国家气象局年均降水空间分布1 km×1 km栅格数据和中国科学院南京土壤研究所土壤有机碳含量空间分布1 km×1 km栅格数据在研究区内的部分。社会经济数据来自2000—2015年北京、天津、河北统计年鉴和2006—2020年北京、天津、河北的土地利用总体规划文件。

## 2 研究方法

### 2.1 模型及研究框架

CLUE-S(conversion of land use and its effects at small region extent)模型最早由荷兰瓦赫宁根大学的“土地利用变化和影响”研究小组在原有的CLUE模型基础上开发, 主要用于探索特定时空尺度上土地利用/土地覆被变化的空间分布与格局特征, 以及分析自然、人类等不同驱动因子对土地变化的影响。CLUE-S模型假设, 某地区的土地利用需求会导致其土地利用类型的变化, 而该地区的土地利用分布格局与土地需求、自然环境驱动因子和社会经济驱动因子处于动态平衡状态(引自王丽艳等, 2010)。在此基础上, 分析每个栅格上不同土地利用类型的竞争关系, 用最具有竞争优势的土地利用类型编号为该栅格赋值, 最终实现土地利用类型变化的情景模拟。

CLUE-S模型主要包括土地政策限制区域模块、土地利用转换参数模块、土地需求模块和土地利用变化空间转换模块4个部分(Verburg et al, 1999; Verburg et al, 2004)。其中, 土地政策限制区域模块根据政策要求划定某一区域或某一地类, 并严格限制其土地利用类型的变化, 包括土地政策限制、生态保护区限制、基本农田限制等。土地利用类型转换参数模块包括土地利用类型转换规则和土地利用类型转换弹性2项内容, 前者表示土地利用能否从一种类型转换为另一种类型, 后者表示转换的难易程度。土地需求模块需要输入不同土地利用类型面积的目标值。最后, 土地利用变化空间转换模块通过多种自然和社会经济驱动因素与土地利用类型

的logistic回归,计算出各个土地利用类型在空间上的转换概率,得出符合目标值的土地利用类型空间适宜性分布,从而得到土地利用变化的模拟结果。

如图1的研究框架所示,考虑到研究区的实际情况,本文没有划定政策限制区域而主要通过不同土地利用类型面积的约束来体现各种情景的需求。土地利用面积需求通过线性规划基于不同主导目标和约束情景得到。CLUE-S模型的各项输入要素包括2015年的土地利用分布图、最终土地需求文件、土地利用转换规则矩阵、驱动因子层和logistic回归方程参数文件,以及模型的一些基础参数,包括土地利用类型的数量、栅格数、行列数、栅格面积、迭代变量等。

## 2.2 不同优化目标和策略情景下的土地利用需求

### 2.2.1 线性规划

计算土地利用需求的线性规划函数如下所示。其中式(1)为目标函数,式(2)为价值量约束条件,式(3)为粮食安全约束条件,式(4)至式(6)分别为某种土地利用类型面积的最小值、最大值和各类型面积总量的约束条件。

$$V = \max \sum_{i=1}^6 v_i s_i \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^6 c_i s_i \geq C_0 \quad (2)$$

$$q_1 s_1 \geq Q_0 \quad (3)$$

$$s_i \geq s_i^* \quad (4)$$

$$s_j \leq s_j^* \quad (5)$$

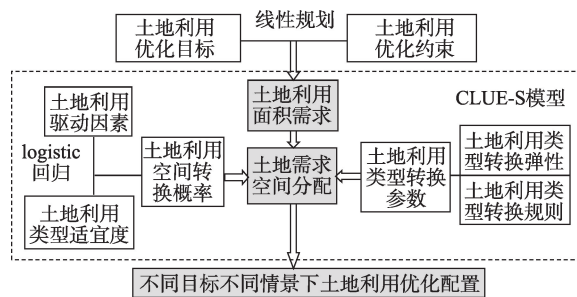


图1 研究框架

Fig.1 Framework of the study

$$\sum_{i=1}^6 s_i \leq S_0 \quad (6)$$

式中: $V$ 为目标价值总量(亿元); $v_i$ 为*i*类土地利用类型单位面积目标价值量(元/m<sup>2</sup>); $s_i$ 为*i*类土地利用类型的总面积(万hm<sup>2</sup>); $c_i$ 为*i*类土地的单位面积约束价值量(元/m<sup>2</sup>); $C_0$ 为2025年土地利用优化配置后的约束价值总量(亿元); $q_1$ 为外推的2025年粮食单产(t/hm<sup>2</sup>); $Q_0$ 为2025年粮食需求量(万t); $s_i^*$ 为*i*类土地利用类型最小面积限制(万hm<sup>2</sup>); $s_j^*$ 为*j*类土地利用类型最大面积限制(万hm<sup>2</sup>); $S_0$ 为研究区总面积(万hm<sup>2</sup>)。

在经济目标的优化中,目标函数(1)中的 $v_i$ 和 $V$ 分别为单位面积GDP和GDP总量,约束条件(2)中的 $c_i$ 和 $C_0$ 分别为单位面积生态系统服务价值量和生态系统服务价值总量。在生态目标的优化中,目标函数(1)中的 $v_i$ 和 $V$ 为生态系统服务价值量,约束条件(2)中的 $c_i$ 和 $C_0$ 为GDP。

不同土地利用类型单位面积GDP采用效益系数法测算(龚建周等, 2010; 赵阳, 2014),首先通过专家打分和AHP层次分析法计算出各类土地利用类型对区域GDP贡献的相对大小,在此基础上,以2015年京津冀地区耕地的经济效益系数为基准,得到其他用地类型的经济效益系数,结果如表1所示。未利用地不参与计算,经济效益系数设为0。不同土地利用类型单位面积生态系统服务价值量使用针对京津冀城市群区域修正后的全国生态系统服务价值当量(谢高地等, 2015)计算得到,以2015年的价格为基准表示。

式(3)中的2025年的粮食单产 $q_1$ 基于统计数据中2000—2015年的粮食产量、粮食播种面积、复种指数和GM(1,1)模型外推得到。2025年粮食需求状况 $Q_0$ 由人均用粮标准乘以人口数得到。根据中国粮食生产安全标准,粮食生产的小康标准线为人均450 kg/a。2025年的人口数同样使用GM(1,1)模型进行预测。

式(4)至式(6)的土地利用面积约束条件中的参数设置在经济目标和生态目标的不同情景下有所不

表1 生态经济效益系数

Tab.1 Weight of ecosystem services value and economic benefit coefficients by land use type

	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
经济效益系数	10.832	17.148	16.125	31.822	163.139	0
单位面积ESV/(元/m <sup>2</sup> )	2.183	10.734	6.574	48.398	0	0.354

注:ESV为生态系统服务价值量(ecosystem services value)。



同,具体见2.2.2小节,但在任何情况下,6种土地利用类型的面积总和不应超过京津冀的区域总面积。

2.2.2 情景参数的设置

“生态保护”“统筹兼顾”“粮食安全”和“经济发展”4种土地利用政策情景的内涵如表2所示。“生态保护”情景主要强调生态环境的保护,偏好生态用地面积(林地、草地、水体)的增加,限制生态用地向其他地类转换的数量。“粮食安全”情景从保障粮食安全、维持社会稳定的因素考虑,要重点保障基本农田面积,严格控制耕地向其他地类转换的数量。“统筹兼顾”情景同时考虑生态保护、粮食安全和经济发展,均衡分配生态用地、耕地和建设用地面积。“经济发展”情景注重经济效益的提升,适当放宽对经济发展的限制,扩大建设用地面积以提高经济效益。

在不同目标下,各情景的约束条件及其约束程度不同,线性规划中相应约束条件的参数不同,具体设置如表3所示。表3中约束条件里面的GDP总量、生态系统服务价值量和粮食需求的变化率的设置均基于对京津冀地区现状趋势的分析,将现状趋势下能达到的增长率作为“统筹兼顾”情景下的参

数,而其他情景根据强调的方面进行相应的上调和下调作出。根据现在的发展趋势,预计2025年京津冀的GDP增长率为6.5%,粮食需求增长率为1%。相应地,“生态保护”情景设置有较低的GDP增长率和粮食需求增长率,“粮食安全”和“经济发展”情景分别有较高的粮食需求增长率和GDP增长率。生态系统服务价值的增长率缺乏参照值,则仅设置为“生态保护”情景增加10%，“统筹兼顾”增加5%,而“粮食安全”和“经济发展”情景不低于现状值即可。针对不同情景对林地、草地、水域和建设用地的面积限制条件根据2006—2020年北京、天津和河北的土地利用总体规划文件制定。

2.3 不同优化目标和情景下的土地利用空间配置

2.3.1 土地利用类型空间转换概率

CLUE-S模型中的空间转换部分是其土地利用变化空间分配模块的重要部分,它的理论基础是土地利用转变首先发生在最有可能出现的位置上,而这种空间分布位置受不同的驱动因素影响。因此,首先要确定影响土地利用转换的驱动因子,包括自然环境要素和社会经济要素两大类。对京津冀城

表2 4种模拟情景及其内涵  
Tab.2 The four simulation scenarios

模拟情景	内涵
生态保护	偏好生态用地(林地、草地、水体)面积的增加,限制生态用地向其他地类转换的数量
统筹兼顾	同时考虑生态保护、粮食安全和经济发展,均衡分配生态用地、耕地和建设用地面积
粮食安全	重点保障基本农田面积,严格控制耕地向其他地类转换的数量,维护粮食安全
经济发展	放宽经济发展限制,适当增加建设用地面积以提高经济效益

表3 2种优化目标下4种模拟情景及其约束条件设置  
Tab.3 The four simulation scenarios and their constraints under the two maximization goals

优化目标	模拟情景	价值量约束	粮食需求约束	土地利用面积约束
经济目标	生态保护	ESV增加10%	增加0.8%	水域面积不少于总面积的3%,林地面积不少于总面积的30%(2006—2020年北京、天津、河北的土地利用总体规划),草地、建设用地面积不小于现状值
	统筹兼顾	ESV增加5%	增加1%	林地、草地、水域、建设用地面积不低于现状值
	粮食安全	ESV不低于现状值	增加1.6%	林地、草地、水域、建设用地面积不低于现状值,耕地面积不低于受保护基本农田面积
生态目标	经济发展	ESV不低于现状值	增加1.3%	林地、草地、水域、建设用地面积不低于现状值
	生态保护	GDP增加5%	增加0.8%	水域面积不少于总面积的3%,林地面积不少于总面积的30%(2006—2020年北京、天津、河北的土地利用总体规划),草地、建设用地面积不小于现状值
	统筹兼顾	GDP增加6.5%	增加1%	林地、草地、水域、建设用地面积不低于现状值
	粮食安全	GDP增加6.5%	增加1.6%	林地、草地、水域、建设用地面积不低于现状值,耕地面积不低于受保护基本农田面积
	经济发展	GDP增加8%	增加1.3%	林地、草地、水域、建设用地面积不低于现状值



市群的土地利用变化驱动因素进行分析,结合数据的可获得性,选择高程DEM、年均降水量、坡度和土壤有机碳含量作为自然驱动力因素,人均GDP和人口密度作为社会经济驱动因素进行土地利用空间转换概率的logistic回归分析。

Logistic回归主要用于计算事件发生的概率,其表达式如下:

$$\log\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)=\beta_0+\beta_1X_{1i}+\beta_2X_{2i}+\cdots+\beta_nX_{ni} \quad (7)$$

式中: $P_i$ 代表单位栅格上出现*i*类土地利用类型的概率; $X_i$ 代表第*i*类驱动因子; $\beta_i$ 代表该种驱动因素的logistic回归系数。对6类土地利用类型出现的概率和各个驱动因子分别做logistic回归,采用逐步回归的方法,解释力较弱的驱动因素将自动剔除,最终得到的回归系数 $\beta$ 即为该种土地利用类型受不同驱动因素影响的空間转换概率。对于logistic回归的拟合度可以使用ROC方法进行检验,ROC曲线下的面积即为ROC值,介于0.5~1.0之间,表示回归结果的概率分布与真实分布的一致性。一般认为ROC值越大,拟合程度越好,自变量具有更好的解释性。

使用CLUE-S模型自带的covert工具,可以将土地利用类型和各驱动因子的栅格数据转换为

TXT数据,继而导入SPSS中进行logistic回归分析,最终得到的回归结果与ROC检验如表4所示。由于驱动因素对不同土地利用类型的解释力不同,每一类土地利用类型logistic回归剔除的弱解释力因子也不同,但不同土地利用类型之间对驱动因子的剔除不会相互影响。例如表4中,仅对水体和建设用地的分布来说,土壤有机碳含量的解释性较弱,在回归中被剔除。驱动因子对几种土地利用类型转换的ROC值都大于0.7,拟合程度较好,由此得到的土地利用类型空间转换概率矩阵是具有解释性的。

2.3.2 土地利用类型转换参数

土地利用类型转换参数部分包括土地利用类型转换规则和土地利用类型转换弹性。土地转换规则通过设定二值化矩阵来代表一种土地利用类型能否转换为另一种类型,0表示不能转变,而1表示可以转变。土地转换弹性代表土地利用类型转换的难易程度,用0~1的数值表示,值越接近0表示越容易转换为其他类型,越接近于1则表示越难转换为其他类型。

对京津冀城市群2000、2005、2010、2015年4个年份的土地利用变化进行分析(表5),发现耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地6类间全部能

表4 Logistic回归分析及ROC检验结果  
Tab.4 Results of logistic regression and receiver operating characteristic (ROC) test

因子	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
高程DEM	-0.001296	0.002152	0.000839	-0.001049	-0.001346	0.001033
人均GDP	-0.000090	-0.000084	-0.000101	0.000040	0.000123	-0.000150
人口密度	-0.000235	-0.001394	-0.000837	-0.000940	0.000493	-0.004780
年均降水量	-0.006083	0.014311	0.001584	0.002384	-0.000694	
坡度	-0.100137	0.064939	0.030768	-0.047361	-0.047361	-0.285026
土壤有机碳含量	0.007466	-0.007323	0.011634			-0.032228
常数	4.465737	-10.705531	-3.152 222	-4.098 485	-1.402 509	-3.639565
ROC检验值	0.811	0.892	0.770	0.770	0.825	0.859

表5 土地利用类型转换规则  
Tab.5 Conversion rules among the different land use types

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	1	1	1	1	1	1
林地	1	1	1	1	1	1
草地	1	1	1	1	1	1
水域	1	1	1	1	1	1
建设用地	1	1	1	1	1	1
未利用地	1	1	1	1	1	1

够互相转换,则转换规则矩阵中的数值均设为1。但转换的难易程度即土地利用类型转换弹性不同(表6)。

3 研究结果

3.1 不同目标与情景下的土地利用面积需求比较

计算得到经济目标和生态目标下4种情景的土地利用类型需求量,如表7所示。生态目标下,耕地在粮食安全情景下的需求最高(820.18万hm<sup>2</sup>),其次为经济发展情景(796.28万hm<sup>2</sup>),而在生态保护情景下最小(757.84万hm<sup>2</sup>),整体上都小于现状值(1008.1万hm<sup>2</sup>)。林地生态保护情景下需求最高(697.55万hm<sup>2</sup>),而在粮食安全情景下需求最少(628.43万hm<sup>2</sup>)。反映出生态保护和粮食安全之间具有权衡关系,耕地的增加会占用部分生态用地面积。对建设用地的需求在生态保护情景下最低(276.98万hm<sup>2</sup>),而在经济发展情景下最高(293.24万hm<sup>2</sup>),体现了生态保护与经济发展之间的权衡。草地在4种情景下的需求状况没有大的改变,说明草地对生态保护、粮食安全和经济发展的作用效果相当,既具有生态保护功能,同时它的畜牧业产值又有益于经济发展和粮食安全。水体面积的高需求主要出现在生态保护情景下,这是由于湿地具有很高的生态效益。未利用地由于不产生任何效益,并且在情景设置中都假设其可利用部分已被完全利用转化为其他用地类型,因而在4种情景下面积没有变化。

表6 土地利用类型转换弹性  
Tab.6 Conversion elasticity of land use types

耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
0.5	0.4	0.5	0.6	0.6	0

将生态目标和经济目标对应的4种情景下的土地利用需求进行比较,发现耕地、草地和水体需求相同,这是由于耕地和草地既有生态价值,又有经济价值,对生态目标和经济目标的作用相差不大,可以说是生态-经济中性的;而水体需求变化不大的原因主要是其转化难度较高,土地利用面积限制较大。林地需求在生态目标下远远大于经济目标,充分体现了林地能够提供较多生态系统服务,对生态系统服务价值的增加有重要作用。而建设用地与之相反,由于能够带来很高的经济价值,在经济目标下的需求都高于生态目标。

3.2 不同目标与情景下的土地利用面积及空间分布模拟结果比较

经济目标和生态目标4种情景下的不同土地利用类型面积如表8所示,土地利用优化空间配置结果如图2和图3所示。还计算了2015—2025年2种优化目标4个情景下的8个土地利用转移矩阵,由于篇幅原因,不在正文中展示。从表8可以看到,优化后各地类的面积与相应的需求面积相差不大,说明模型的模拟结果较好。

结果显示,生态目标下耕地在各个情景中均有所减少,而林地则均有所增加,结合图2可以看到林地主要是由耕地转化而来,其增加主要分布在燕山太行山一带以及河北沧州市。林地在生态保护情景中面积最多,为697.76万hm<sup>2</sup>,从图2b中可以明显看到北部燕山山脉、坝上高原地带以及沧州市的大量耕地转化为了林地。草地面积在4种情景下变化不大,主要分布在坝上高原地带。水体面积在生态保护情景下最多,为63.29万hm<sup>2</sup>,其增加主要出现在北京市郊区外围和东部沿海地带,北京周边增加的水域面积应当主要是由于对市区原来受到占用和污染影响而缩减的水域面积施行保护政策而

表7 2种优化目标下的土地利用需求  
Tab.7 Demand of land use types under the two maximization goals (万hm<sup>2</sup>)

优化目标	情景	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
经济目标	生态保护	757.84	642.11	336.52	64.21	332.42	7.27
	统筹兼顾	773.01	558.11	336.52	60.82	404.64	7.27
	粮食安全	820.18	491.57	336.52	60.82	424.01	7.27
	经济发展	796.28	496.43	336.52	60.82	443.05	7.27
生态目标	生态保护	757.84	697.55	336.52	64.21	276.98	7.27
	统筹兼顾	773.01	677.64	336.52	60.82	285.11	7.27
	粮食安全	820.18	628.43	336.52	60.82	287.15	7.27
	经济发展	796.28	646.23	336.52	60.82	293.24	7.27

表8 2种优化目标下的土地利用优化面积  
Tab.8 Land use area under the two maximization goals (万 hm<sup>2</sup>)

优化目标	情景	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
经济目标	生态保护	758.34	642.16	336.77	63.31	332.54	7.25
	统筹兼顾	773.32	558.44	336.92	59.96	404.47	7.26
	粮食安全	820.21	491.91	336.93	59.92	424.15	7.25
	经济发展	796.73	496.62	336.68	60.01	443.10	7.23
生态目标	生态保护	758.20	697.76	336.72	63.29	277.13	7.27
	统筹兼顾	773.25	678.61	336.09	59.79	285.36	7.27
	粮食安全	819.12	629.56	336.83	60.05	287.55	7.26
	经济发展	796.16	646.62	337.01	59.86	293.44	7.28

得到的。建设用地与现状相比均有一定程度的增加,在经济发展情景下最多,为293.44万hm<sup>2</sup>,其增加主要表现在原有建设用地向周边地类的扩展。而耕地与现状相比则有较大的减少,在不同的目标和情景下都主要向林地和建设用地进行转化。中部平原及东南沿海地区的未利用地主要向耕地、林地和建设用地转化。经济目标下4种情景之间的关系与此类似。

将生态目标与经济目标对应的4种情景进行横向比较时发现,耕地、草地和水体面积相差不大,其分布区域也相对一致,但生态目标下林地面积较多而建设用地较少。通过土地利用转移矩阵得到,实际上在生态目标中耕地大量向林地转出,而在经济目标中耕地大量向建设用地转出。从图2和图3能够看到,林地的相对增加主要分布在沧州市境内。经济目标下建设用地沿原有范围大幅度向外扩张,在经济发展情景下面积达到最多,为443.10万hm<sup>2</sup>,该情景下沧州市大量耕地转换为建设用地,而在生态目标下这些用地都大量转换为林地。沧州市耕地向林地的转化符合其构建京津冀生态环境支撑区,创建国家森林城市的城市造林目标,这说明生态目标符合国家发展政策的需求。

3.3 不同目标与情景下土地生态-经济价值比较

基于不同目标不同情景下的土地利用优化配置结果,通过地均GDP和生态系统服务单位面积价值当量计算研究区可获得的生态系统服务价值和经济价值如表9所示。结果显示,生态目标下,“生态保护”“统筹兼顾”“粮食安全”和“经济发展”4种情景得到的生态系统服务价值分别为14423.58亿元、14077.34亿元、13668.41亿元、13793.41亿元,经济价值分别为72832.03亿元、73887.77亿元、73921.01亿元和74922.60亿元。经济目标下,4种情

景的的优化结果得到的生态系统服务价值分别为13828.38亿元、12801.30亿元、12187.65亿元和12189.66亿元,经济价值分别为80921.12亿元、91278.20亿元、93854.73亿元和96771.49亿元。生态目标下的生态保护情景获得的生态系统服务价值最高(14423.58亿元),而经济目标下的经济发展情景获得的经济价值最高(96771.49亿元)。在生态目标下,4种情景优化结果带来的生态系统服务价值较2015年的12224.82亿元都有较大增加。而经济目标下,仅在生态保护和统筹兼顾情景下生态系统服务价值有小幅增加,而在粮食安全和经济发展情景下则略有减少,但经济价值较生态目标下的结果有较大提高。

4 结论与讨论

本文的研究结果进一步证实了经济和生态之间的权衡关系。随着可持续发展和生态文明建设的战略需求,生态与经济协调发展成为以京津冀为代表的城市群未来发展过程中所面临的重要问题,是延续在经济最大化目标下考虑生态环境保护的策略,还是改变思路在保障一定的经济效益增长基础上追求生态系统服务价值的最大化?本文基于模型和情景分析,对2种策略下的土地利用优化结果的定量比较表明,在生态系统服务价值严重偏低的京津冀城市群地区,以生态系统服务价值最大化作为目标的策略比以经济效益最大化作为目标的策略更具优势。经济目标下不一定能保证生态系统服务水平的维持,而生态目标下即便是最严格的生态保护情景,也能够满足经济效益小幅增长的要求。与经济目标相比,生态目标下的优化能够避免耕地向建设用地的大量转化。



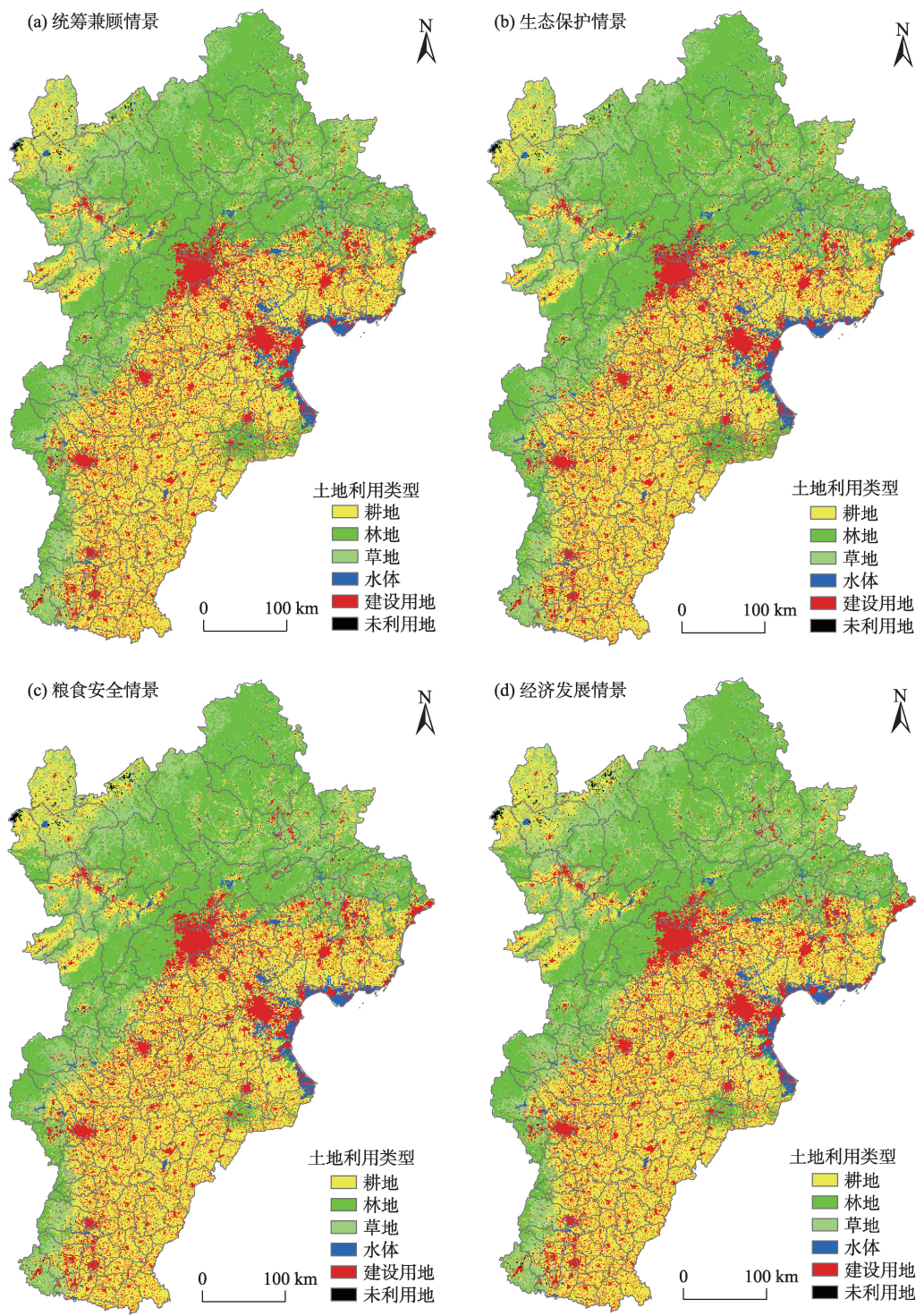


图2 生态系统服务最大化目标下2025年土地利用优化配置

Fig.2 Land use spatial pattern in 2025 under different scenarios with ecosystem services maximization goal

经济目标和生态目标2种目标的4种情景分别代表了不同的政策选择,很难说哪一种是绝对的最优情景,但就京津冀城市群生态和经济发展的现状来看,经济发展超前而生态发展滞后,相对来说,经济目标下的生态保护情景和生态目标下的统筹兼

顾情景能够显著提高生态系统服务价值量,又能够维持经济效益的明显增长,具有实践价值。2种目标的不同情景下,草地、水体和未利用地的面积相差不大,差异主要体现在耕地、林地和建设用地3种类型上,说明这3种土地利用类型的管理对区域经



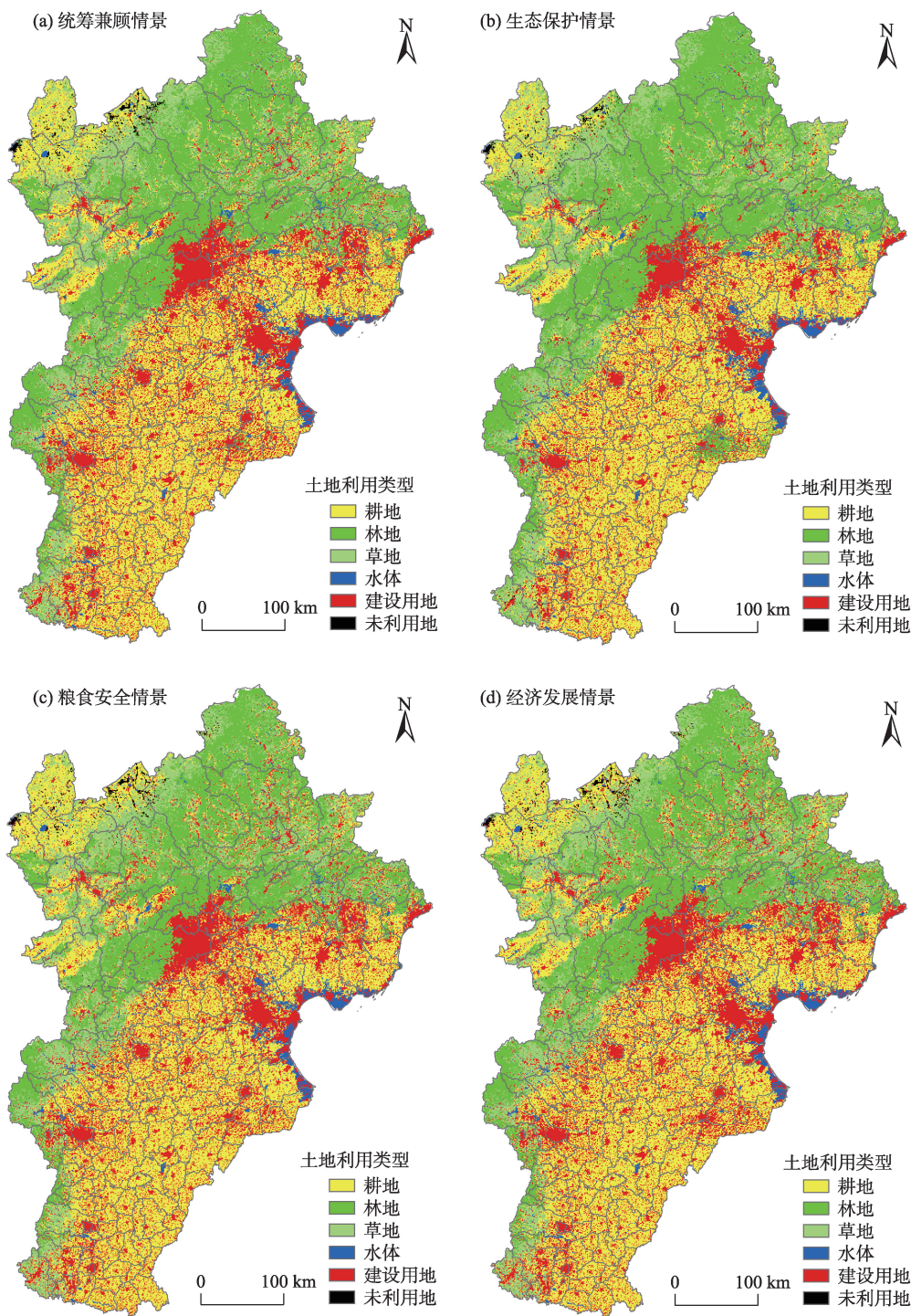


图3 经济价值最大化目标下2025年土地利用优化配置

Fig. 3 Land use spatial pattern in 2025 under different scenarios with economic value maximization goal

济效益和生态系统服务的格局有重要影响。耕地、林地和建设用地之间的转化又恰好是京津冀协同发展、平原林生态建设、新型城镇化等一系列政策的主要涉及对象。因此京津冀城市群地区有必要开展土地利用优化配置工作,实现土地利用效益的最大化。线性规划和CLUE-S模型结合的方法,能

够简单有效地针对不同优化目标和发展策略进行最优规划,得到土地利用空间配置的帕累托最优结果,结合不同目标不同情景下生态系统服务价值和经济价值的直观比较,是土地利用政策制定的有力工具。

本文模型的应用结果受到情景参数设置的影

表9 不同目标和情景下模拟的土地利用价值优化结果

Tab.9 Land use values under different scenarios  
with different maximization goal (亿元)

目标	情景	生态系统服务价值	经济价值
2015年现状		12224.82	69358.80
经济目标	生态保护	13828.38	80921.12
	统筹兼顾	12801.30	91278.20
	粮食安全	12187.65	93854.73
	经济发展	12189.66	96771.49
生态目标	生态保护	14423.58	72832.03
	统筹兼顾	14077.34	73887.77
	粮食安全	13668.41	73921.01
	经济发展	13793.41	74922.60

响。基于统计数据及经验参数设置的情景参数,使模型对真实情景预估的精确性受到影响。本文未考虑CLUE-S模型中设置政策限制区域的过程,是否有必要划出基本农田保护区并限制该区域的土地利用变化,或者划出基本农田,严格限制其向其他地类的转移等,需要在进一步的研究中进行探讨和改进。其次,在线性规划的约束条件中,不同情景下的GDP增长率和粮食需求增长率仅通过简单的趋势分析进行设置,在未来的研究中可以通过模型模拟等方法加以改进。未来通过对相关参数进行更加精细和符合现实发展规律的设置,可提高土地利用优化配置结果的准确性,从而更好地指导京津冀城市群的土地利用决策。

参考文献(References)

包蕊, 刘峰, 张建平, 等. 2018. 基于多目标线性规划的甲积峪小流域生态系统服务权衡优化 [J]. 生态学报, 38(3): 812-828. [Bao R, Liu F, Zhang J P, et al. 2018. Multi-objective linear programming-based trade-off and optimization of the ecosystem services in Jiajiyu small watershed in the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 38(3): 812-828. ]

陈卓, 李秀霞, 徐龙. 2013. 基于经济-生态双重目标的土地利用结构优化: 以吉林省西部为例 [J]. 国土资源科技管理, 30(5): 28-34. [Chen Z, Li X X, Xu L. 2013. Optimization of land use structure based on dual targets of ecology and economy: A case study of west of Jilin Province. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 30(5): 28-34. ]

方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 2016. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径

[J]. 地理学报, 71(4): 531-550. [Fang C L, Zhou C H, Gu C L, et al. 2016. Theoretical analysis of interactive coupled effects between urbanization and eco- environment in mega-urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 71(4): 531-550. ]

龚建周, 刘彦随, 张灵. 2010. 广州市土地利用结构优化配置及其潜力 [J]. 地理学报, 65(11): 1391-1400. [Gong J Z, Liu Y S, Zhang L. 2010. The optimal allocation of land use and its potential appraisal in Guangzhou City. *Acta Geographica Sinica*, 65(11): 1391-1400. ]

郭小燕, 刘学录, 王联国. 2016. 以提高生态系统服务为导向的土地利用优化研究: 以兰州市为例 [J]. 生态学报, 36(24): 7992-8001. [Guo X Y, Liu X L, Wang L G. 2016. Land use optimization in order to improve ecosystem service: A case of Lanzhou City. *Acta Ecologica Sinica*, 36(24): 7992-8001.]

李双成, 等. 2014. 生态系统服务地理学 [M]. 北京: 科学出版社: 1-58. [Li S C, et al. 2014. The geography of ecosystem services. Beijing, China: Science Press: 1-58. ]

李天猜, 李韦, 冯长春, 等. 2016. 湘江新区土地利用结构多目标规划及决策偏好分析 [J]. 地域研究与开发, 35(1): 132-138. [Li T C, Li W, Feng C C, et al. 2016. Multi-objective land use planning and decision analysis in Xiangjiang new area. *Areal Research and Development*, 35(1): 132-138. ]

刘超, 许月卿, 孙丕苓, 等. 2016. 土地利用多功能性研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 35(9): 1087-1099. [Liu C, Xu Y Q, Sun P L, et al. 2016. Progress and prospects of multi-functionality of land use research. *Progress in Geography*, 35(9): 1087-1099. ]

刘金龙, 马程, 王阳, 等. 2013. 基于径向基函数网络的京津冀地区生态系统服务脆弱性评估 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 49(6): 1040-1046. [Liu J L, Ma C, Wang Y, et al. 2013. Assessing the vulnerability of ecosystem services of Beijing- Tianjin- Hebei area based on radial basis function network. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 49(6): 1040-1046. ]

刘静怡, 蔡永立, 於家, 等. 2013. 基于CLUE-S和灰色线性规划的嘉兴北部土地利用优化配置研究 [J]. 生态与农村环境学报, 29(4): 529-536. [Liu J Y, Cai Y L, Yu J, et al. 2013. Optimization of land use arrangement in North Jiaxing based on CLUE-S and grey linear programming models. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 29(4): 529-536. ]

马程, 李双成, 刘金龙, 等. 2013. 基于SOFM网络的京津冀地区生态系统服务分区 [J]. 地理科学进展, 32(9): 1383-1393. [Ma C, Li S C, Liu J L, et al. 2013. Regionalization



- of ecosystem services of Beijing-Tianjin-Hebei area based on SOFM neural network. *Progress in Geography*, 32(9): 1383-1393. ]
- 王丽艳, 张学儒, 张华, 等. 2010. CLUE-S模型原理与结构及其应用进展 [J]. *地理与地理信息科学*, 26(3): 73-77. [Wang L Y, Zhang X R, Zhang H, et al. 2010. Principle and structure of CLUE-S model and its progresses. *Geography and Geo-Information Science*, 26(3): 73-77. ]
- 王月健, 丁武泉, 谢付杰. 2010. 基于线性规划法的轮台县土地利用结构优化 [J]. *安徽农业科学*, 38(9): 4733-4734. [Wang Y J, Ding W Q, Xie F J. 2010. Optimization on land use structure in Luntai County based on linear programming method. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38(9): 4733-4734. ]
- 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 2015. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. *自然资源学报*, 30(8): 1243-1254. [Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. 2015. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. *Journal of Natural Resources*, 30(8): 1243-1254. ]
- 许小亮, 李鑫, 肖长江, 等. 2016. 基于CLUE-S模型的不同情景下区域土地利用布局优化 [J]. *生态学报*, 36(17): 5401-5410. [Xu X L, Li X, Xiao C J, et al. 2016. Land use layout optimization under different scenarios by using the CLUE-S model. *Acta Ecologica Sinica*, 36(17): 5401-5410. ]
- 叶浩, 濮励杰. 2010. 苏州市土地利用变化对生态系统固碳能力影响研究 [J]. *中国土地科学*, 24(3): 60-64. [Ye H, Pu L J. 2010. Study on the impact of land use change on the capability of carbon sequestration of ecosystem in Suzhou City. *China Land Science*, 24(3): 60-64. ]
- 张鸿辉, 曾永年, 谭荣, 等. 2011. 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*, 66(7): 972-984. [Zhang H H, Zeng Y N, Tan R, et al. 2011. A model for regional land use optimization allocation based on multi-agent system and its application. *Acta Geographica Sinica*, 66(7): 972-984. ]
- 张佳会, 黄全富, 王力. 2001. 最优线性规划法在土地利用总体规划中的应用 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 18(1): 36-39. [Zhang J H, Wang Q F, Wang L. 2001. The utilization of the optimum linear plan method in the masterplan of land utilization. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition)*, 18(1): 36-39. ]
- 赵阳, 张艺, 涂志华, 等. 2014. 基于生态服务价值的多目标水源地土地利用结构优化 [J]. *中国环境科学*, 34(1): 232-238. [Zhao Y, Zhang Y, Tu Z H, et al. 2014. Multi-objective optimization of land use structures for water resources area based on eco-service value. *China Environment Science*, 34(1): 232-238. ]
- Blumstein M, Thompson J R. 2015. Land-use impacts on the quantity and configuration of ecosystem service provisioning in Massachusetts, USA [J]. *Journal of Applied Ecology*, 52(8): 1009-1019.
- Verburg P H, Veldkamp A. 2004. Projecting land use transitions at forest fringes in the Philippines at two spatial scales [J]. *Land Landscape Ecology*, 19(1): 77-98.
- Verburg P H, Veldkamp A, Dekoning G H J, et al. 1999. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use [J]. *Ecological Modelling*, 116(1): 45-61.

## Optimal allocation of land use types in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on ecological and economic benefits trade-offs

MA Bingying<sup>1</sup>, HUANG Jiao<sup>2,3</sup>, LI Shuangcheng<sup>2,3\*</sup>

(1. School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** In order to achieve harmonious ecological and economic development in urban agglomerations, it is important to explore the trade-offs between environmental protection and economic development, and use this knowledge to optimize land use allocation. This study aimed to simulate land use changes in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration with different goals and under different scenarios in 2025 to identify the optimal land use allocation strategies based on the trade-offs between ecological and economic benefits. In order to meet the land use demands for environment-friendly development in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, we developed two optimization goals—ecosystem services value maximization and economic value maximization, and four land use scenarios—environmental protection, balanced development, food security, and economic development focus. A CLUE-S model was built to simulate and predict the optimal land use allocation strategy. The results show that the optimal land use allocations with the ecosystem services maximization goal were very different comparing to that with the economic value maximization goal. The ecosystem services value is estimated to be approximately 1442.36 billion Yuan with the ecosystem services maximization goal and under the environmental protection scenarios, more than that with the economic value maximization goal and under the same scenario. Spatially, the increase of ecologically beneficial land-use types, including forest land and grassland, is more often seen in the Bashang Plateau, Yanshan Mountains, and Taihang Mountains. The increase of water areas often occurs in coastal regions in the east. There are significant trade-offs between ecosystem services value maximization and economic value maximization. The results of this trade-off analysis can provide a basis for future ecological projects in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration.

**Keywords:** ecological-economic benefits trade-off; land use allocation; CLUE-S model; Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration