

不同空间约束条件下的城镇土地利用变化多预案模拟

周 锐^{1,2}, 苏海龙^{1,3*}, 胡远满², 李月辉², 刘 森²

(1. 复旦大学城市规划与发展研究中心, 上海 200433; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016;
3. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

摘 要: 为研究不同预案下辛庄镇未来几十年的土地利用变化情况, 基于高分辨率遥感影像获取辛庄镇四期土地利用历史数据, 结合 GIS 空间分析技术, 从城镇土地利用发展趋势、耕地保护和生态安全角度设计了目前趋势发展、城镇规划和基本农田保护、生态环境保护 3 种预案, 对研究区土地利用变化进行相应约束, 利用 CLUE-S 模型模拟不同预案下辛庄镇未来 20 a 土地利用变化过程, 并从时空特征、空间格局和生态风险等方面对不同预案下的土地利用预测结果进行比较分析。结果表明, 在设计 3 种预案下, 未来的村镇建设用地均将持续增加, 其中目前趋势发展预案尤为显著, 并以消耗大量的耕地资源为代价。不同预案下的土地利用变化特征、景观格局和生态安全存在明显的分异特征, 综合比较结果表明城镇规划和基本农田保护预案是辛庄镇未来土地利用变化的推荐预案。CLUE-S 模型模拟结果能较好地反映不同约束条件下的未来土地利用变化以及潜在生态风险, 基于该模型的预案设计和空间模拟方法可很好地辅助土地利用规划决策。

关键词: 土地利用, 模型, 生态, 空间约束, CLUE-S, 预案设计

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.056

中图分类号: F301.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0300-09

周 锐, 苏海龙, 胡远满, 等. 不同空间约束条件下的城镇土地利用变化多预案模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 300—308.

Zhou Rui, Su Hailong, Hu Yuanman, et al. Scenarios simulation of town land use change under different spatial constraints[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 300—308. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

土地利用/覆被变化 (land use/cover change, LUCC) 作为全球环境变化与可持续发展的重要研究内容^[1-3], 受自然、人文和社会经济等众多因素在不同时间和空间尺度上的综合影响, 是一个极其复杂的系统过程^[4-5]。模型模拟是预测未来土地利用变化的重要方法, 土地利用变化模型的应用是深入了解土地利用变化过程、驱动机制、动态规律^[6]、生态效应^[7-8]和环境影响评价^[9]的重要技术手段。应用模型对不同空间约束条件下的土地利用变化和生态后果进行模拟分析对于科学决策具有重要的意义^[10]。模型的建立有助于系统地分析土地利用变化和驱动因素的定量关系, 对于理解和预测土地利用格局和过程, 也具有不可替代的作用, 可用来指导人类对土地合理利用及 LUCC 观测系统和试验的设计^[11-12], 同时在景观变化模拟预测、区域开发政策与城镇规划方案评估以及环境影响评价方面均表现出重要作用。CLUE-S (conversion of land use and its effects at small regional extent) 模型作为经

验统计模型的代表^[13], 基于土地利用与驱动因子之间的定量关系对区域内各种土地利用类型之间的竞争进行系统动力学仿真, 在模拟土地利用时空动态方面具有较高的模拟效力和重要的应用价值^[14], 可同时模拟多种土地利用类型的数量和位置变化, 且具有统计模型共有的简化问题和易应用的优点。目前的 CLUE-S 模型在土地利用变化的应用研究中, 主要侧重各土地利用类型数量约束方面的考虑, 而对空间限制区域的约束较少涉及, 而加强空间约束的研究, 将对土地利用空间规划具有重要的指导意义。

“预案”研究方法作为辅助决策的工具可追溯到 20 世纪 50 年代, 20 世纪 80 年代以后逐渐被用于协调保护与开发的矛盾、以可持续发展为目标的区域与环境管理及规划的实践中^[15-17]。设计预案时, 首先必须把握现实状况, 同时还必须要侧重于对未来各种可能性的探索并寻求实现的途径^[18]。从决策论角度而言, 无论是以经济发展或是以生态保护为目标的可持续规划都是非常困难的, 甚至是不可能的^[19]。也就是说规划是不可能绝对的、唯一的, 既非经济决定论的, 也非环境决定论的^[20]。区域土地利用变化受多种因素的综合制约, 存在着阈限范围内的最佳发展模式, 预案设计的目的就是帮助决策者寻求空间规划的多选择方案, 使他们在面临未来不同的经济、社会和政策导向下能减少盲目性, 并做出相应的最佳决策^[21]。

CLUE-S 模型可以应用到城镇土地变化的预案规划中, 通过对比不同预案下的模拟结果, 从城乡统筹、社会经济持续发展和生态环境保护等方面综合筛选出相对

收稿日期: 2010-09-06 修订日期: 2011-02-22

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目 (2006BAJ10B05); 国家自然科学基金资金项目 (50808048、40871245)

作者简介: 周 锐 (1981—), 男, 辽宁营口人, 博士, 主要研究方向为土地利用变化、城镇规划和 3S 技术应用。上海 复旦大学城市规划与发展研究中心, 200433。Email: zhourui1215@163.com

*通信作者: 苏海龙 (1970—), 男, 河南开封人, 高级工程师, 主要从事城市规划设计与理论研究。上海 复旦大学环境科学与工程系, 200433。

Email: fdsuhailong@126.com

适宜的城镇土地利用总体规划预案。利用 CLUE-S 模型进行不同的政策和规划预案下城镇总体布局和土地利用动态变化的研究,能够弥补传统的基于静态的城市空间结构研究方法的不足,实现对复杂的城镇土地利用系统的空间格局动态及其生态影响进行模拟和对比评价,规划师和管理者根据不同的研究需要规划多种预案,探索多种可选择的城镇土地发展空间和模式,进行多个规划方案比较和选择,辅助城市未来土地利用规划决策^[22]。本研究利用 CLUE-S 模型模拟不同约束条件下的土地利用,分析不同政策约束管理条件对土地利用变化的影响。所设计的预案侧重点不同,代表辛庄镇土地利用变化的3个不同途径和方向。预案过程中必然包括一定的假定因素和主观因素,而且人类对土地干预所导致的后果是极其复杂的,因而对各预案模拟结果的评价也存在一定的约束性和不确定性。实际上,决策者可以依据决策目标和规划目的,考虑不同限制条件设计更多的预案或结合领导意图和专家意见,设计更为综合和更具可操作性的规划方案,以达到区域经济与生态环境保护的协调快速发展的目的。

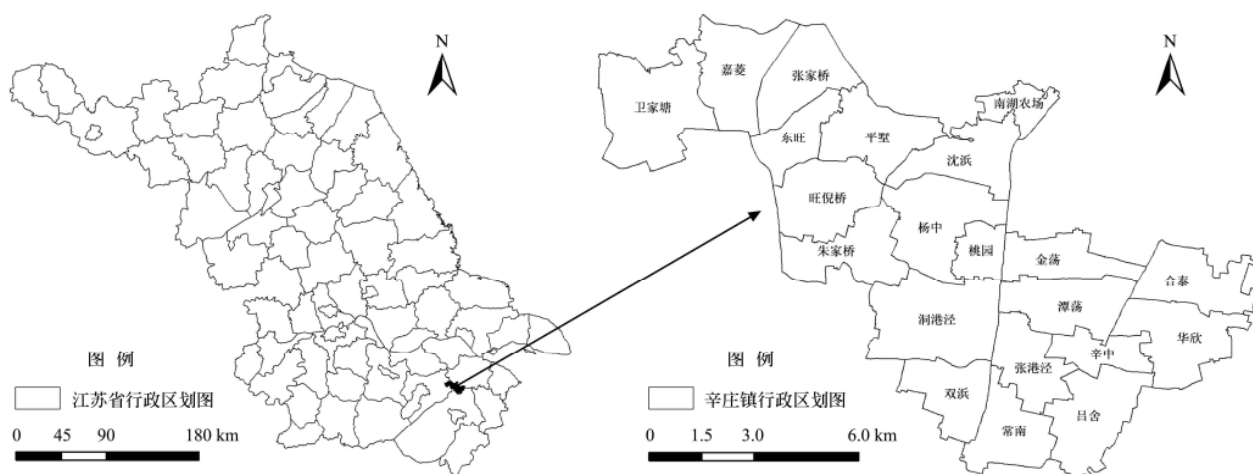


图1 辛庄镇地理位置图

Fig.1 Location of the Xinzhuang Town in Jiangsu Province

1.2 数据来源与处理

本研究所使用的数据包括:辛庄镇1980和1991年航空影像、2001年IKONOS和2009年Quickbird卫星影像、1980年地形图(1:10 000)、2005年的行政区划图及2009年研究区均匀分布的405个GPS采样点。

应用遥感分析软件ERDAS image9.1对地形图进行几何校正,利用校正后的地形图及其投影信息分别对各期航片和卫片进行几何精校正,坐标系统采用Transverse Mercator投影,Krasovsky椭球体,中央经线123°E,RMS (root mean square)误差控制在1个像元内,然后进行图像增强处理;在ArcGIS9.0环境下进行目视解译,首先获得2009年土地利用图,应用采样点校验的解译精度达95.2%,土地利用分类参照全国《土地利用现状调查技术规程》,结合当地的实际情况,将研究区土地利用划分为居住用地、旱地、水田、鱼塘、林地、草地、工业用地、水体、菜地和园地10种类型。以此为基础,利用多时相

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

辛庄镇地处江苏省常熟市南部(120°32'~120°44'E, 31°29'~31°37'N),2003—2005年由原辛庄、杨园和张桥3镇合并而成,是苏州市最新一轮总体规划中重点发展的两大中心乡镇之一,东连沙家浜旅游度假区,西邻无锡市,距苏州、无锡约50 km,距南京、杭州约190 km。227省道贯穿全境,苏虞张一级公路和锡太一级公路在镇区内交汇,元河塘与望虞河2条通航河道穿镇而行,水陆交通便捷。全镇总面积104.26 km²,截至2008年底,全镇户籍人口7.55万,外来人员5.2万,下辖2个街道办事处、20个村、3个居委会和1个南湖农场(图1)。辛庄镇系长江三角洲冲积平原,地势极为平坦,海拔0.5~6.3 m,隶属北亚热带南部湿润季风气候区,气候温和,光照充足,雨量充沛,无霜期长,年均气温17.1℃,年均日照2 118.6 h,年降水量为1 248.4 mm。近年来,随着辛庄镇城镇化和工业化进程的加快,大量的耕地被建设用地侵占,生态环境状况日益恶化。

连续对比法^[23],依次得到2001、1991和1980年土地利用图。但由于CLUE-S模型对面积比例的限制(各类型面积必须大于研究区总面积的1%才能运行),本研究对分类系统进行了调整,将10种类型合并为6类,其中居住用地和工业用地整合为新的分类系统中的建设用地,旱地和菜地合并为旱地,园地、草地和林地合并为林地;水田、鱼塘和水体不变。

在GIS软件支持下,从各期遥感影像上分别得到相应的居民点、道路和河流信息,并结合对应年份的道路图和河流水系图进行修正,利用ArcGIS9.0的空间分析模块分别生成居民点、道路和河流的距离分析图层。

1.3 研究方法

1.3.1 CLUE-S模型

本研究应用CLUE-S模型对研究区的土地利用变化进行多种预案模拟,该模型是荷兰瓦格宁根大学环境科学系的Verburg等科学家在其较早的CLUE模型的基础上为

小尺度的研究区域开发的^[13],在对区域土地利用变化的经验理解的基础上,通过定量分析土地利用变化与其社会、经济、技术及自然环境等驱动因子之间的关系,来模拟土地利用变化,探索土地利用演变的时空规律,进而对未来土地利用变化进行预测^[24],模拟时间步长为 1 a。

CLUE-S 模型由 2 个主要模块组成,即非空间模块和空间模块。非空间模块通过对人口、社会经济以及政策法规等土地利用变化驱动因素的分析,计算每年研究地区对不同土地利用类型的需求变化,作为模型的输入,逐年的需求变化在基于栅格系统的空间模块各候选单元进行分配;空间模块则是根据各种驱动因素计算每个空间单元(栅格)的概率,在综合分析土地利用的空间分布概率适宜图、土地利用变化规则和初期土地利用分布现状图的基础上,根据总概率大小对土地利用的数量变化进行空间分配,从而实现土地利用时空动态变化的模拟。

1.3.2 模型设置

1) 预案设计

预案设计应遵循辛庄镇目前和未来的区域开发政策、最新修编的辛庄镇土地利用总体规划(2006—2020 年)和该地区生态环境保护 and 可持续发展政策。从城镇发展的历史趋势、空间格局和生态安全角度对土地利用变化进行相应约束,从而考察不同空间约束条件下辛庄镇未来土地利用变化所表现出的各种特征及其带来的生态环境影响。通过修改 CLUE-S 模型的输入图层和调整模型参数可以实现不同预案下的土地利用变化预测。本研究通过设定区域排除图层和有关参数设计了 3 种土地利用变化预案。

①目前趋势发展预案(CT)。即未来土地利用变化延续 1980—2009 年的发展趋势,所采用的排除图层为研究区 2009 年的主要城镇建设用地区和主要河流,包括辛庄镇连片的居住用地、工业园区及南湖荡、嘉陵荡、望虞河等主要水域。

②城镇规划和基本农田保护预案(PF)。主要参照最新修编的土地利用总体规划,将城镇和主要道路的周边地区作为土地利用变化主要发生区域,这些主要道路代表研究区与周边其他城镇之间的对外经济联系,以构建规模合理的紧凑式的土地利用发展格局;同时依据总体规划中确定的远离城市和主干道的不得占用的基本农田区域,对保障国家粮食安全、维持社会稳定、促进经济社会全面、协调、可持续发展具有十分重要的意义。考虑城镇发展和产业用地不可避免要占用农田,因此要提高其利用审批门槛,将其纳入限制建设区,严格控制区内基本农田转变用途。排除区域包括重点规划区和 227 省道、苏虞张公路、锡太公路、沈卫线 500 m 缓冲区以及镇内其他主要道路 200 m 缓冲区以外的广大基本农田保护区域。

③生态环境保护预案(EE)。主要是保护和改善地区整体生态环境,促进研究区的可持续发展,基于此预案可保护面积较大的林地、草地、水体、生态保护区和湿地保护区等对地区生态安全起重要作用的要素。具体设置南湖荡湿地保护区、嘉陵荡湿地保护区和望虞河及其周边 300 m 范围内区域,昆成湖生态保护区(辛安塘以东的全部地区)、元和塘和辛安塘 200 m 及其他河流 50 m 范围内的区域为排除区域。

各预案的设置详见图 2。



图 2 不同空间约束条件下的预案设计

Fig.2 Scenario design based on different spatial constraints

2) 空间驱动力分析

Logistic 回归是土地利用变化研究中常用的一种方法^[25-26]。CLUE-S 模型运用二值 Logistic 逐步回归计算每一种地类在区域内每个像元出现的概率,通过比较同一位置各种地类出现概率的大小进行空间分配。Logistic 计算公式如下

$$\text{Log} \left\{ \frac{p_i}{1-p_i} \right\} = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \cdots + \beta_n X_{n,i} \quad (1)$$

式中, P_i 为地类 i 在某一位置上出现的概率; $X_{n,i}$ 为各备选驱动因子在该位置上的值; β 为回归方程的解释变量系数。本研究应用 SPSS 进行回归分析,选择如下 11 个回归因子:与河流距离、与村政府距离、与一级道路距离、与二级道路距离、与居民点距离、国民生产总值、工业总产值、农业总产值、农民人均收入、粮食总产量和人口密度。辛庄地区人口密集、经济发达,所以选择了较多与社会经济发展有关的因子。预测的基准年为 2009 年,

因此各驱动因子的值更新至 2009 年。

Logistic 回归结果的检验采用 Pontius 提出的 ROC (relative operating characteristics) 方法评价^[27]。通常，当 ROC 值大于 0.7 时，可以认为所选取的驱动因子具有较好的解释能力。各地类 Logistic 回归结果见表 1。其中 Beta 系数是由 Logistic 回归方程计算得到，其值将输入 CLUE-S 模型的参数文件 alloc.reg 中。Exp(β)是 Beta 系数以 e 为底的自然幂对数，其值等于事件的发生比率 (Odds Ratio)，表示当解释变量（驱动因子）每增加一个单位，

土地利用类型发生比的变化情况。

ROC 检验结果发现，各地类的 ROC 值均大于 0.75，表明所选驱动因子对各地类的空间分布情况具有较好的解释能力，其中水体和建设用地的 ROC 值较高，分别为 0.988 和 0.851，说明驱动因子对这二类用地的解释能力较强。旱地和水田的 ROC 值较低，分别为 0.759 和 0.792，旱地精度较低的原因可能主要是其分布较分散，具有较强的不确定性特征；而水田的面积较大，驱动因子对其空间分布差异的解释不显著。

表 1 各土地利用类型 logistic 逐步回归结果
Table 1 Stepwise regression results of logistic equation for different land use types

驱动因子	建设用地		旱地		水田		鱼塘		林地		水体	
	Beta	Exp(β)	Beta	Exp(β)	Beta	Exp(β)	Beta	Exp(β)	Beta	Exp(β)	Beta	Exp(β)
a	-0.0013	0.9987	-0.0002	0.9998	0.0002	1.0002	0.0007	1.0007	-0.0009	0.9991	4.44E-05	1.0000
b	-0.0005	0.9995	-4.2E-05	1.0000	0.0001	1.0001	0.0002	1.0002	0.0001	1.0001	0.0001	1.0001
c	-0.0011	0.9989	-0.0001	0.9999	-0.0045	0.9955	0.0037	1.0037	-0.0017	0.9983	0.0017	1.0017
d	-1.11E-05	1.0000	3.43E-05	1.0000	1.35E-05	1.0000	1.16E-05	1.0000	-3.3E-05	1.0000	-1.3E-05	0.9999
e	3.94E-06	1.0000	-1E-05	1.0000	-3.9E-06	1.0000	-4.2E-06	1.0000	5.71E-06	1.0000	3.88E-06	1.0000
f	-0.0002	0.9998	0.0003	1.0003	0.0003	1.0003	-0.0004	0.9996	-0.0004	0.9996	2.83E-05	1.0000
g	0.0003	1.0003	-0.0002	0.9998	-0.0003	0.9997	0.0001	1.0001	-0.0002	0.9998	3.1E-05	0.9999
h	-0.0001	0.9999	-0.0002	0.9998	2.57E-05	1.0000	0.0002	1.0002	-0.0001	0.9999	6.02E-06	1.0000
i	0.0004	1.0004	0.0003	1.0003	-0.0007	0.9993	-0.0006	0.9994	0.0008	1.0008	0.0002	1.0002
j	0.0048	1.0048	-0.0092	0.9908	0.008	1.008	0.0063	1.0063	0.0037	1.0037	-0.2349	0.7906
k	-0.0225	0.9777	-0.002	0.998	0.0015	1.0015	0.0061	1.0061	0.0029	1.0029	0.0015	1.0015
l	-3.5783	0.0279	-0.7188	0.4873	2.3346	10.3249	-4.1521	0.0157	-0.0193	0.9809	2.1103	8.2511
ROC	0.851		0.759		0.792		0.812		0.815		0.988	

注：a：与一级道距离；b：与村政府距离；c：与二级道路距离；d：国民生产总值；e：工业总产值；f：粮食总产量；g：农民人均收入；h：农业总产值；i：人口密度；j：与河流距离；k：与居民点距离；l：常量；Beta：回归系数；Exp(β)：发生比率。

3) 模拟的时空尺度设定

①空间尺度。空间尺度指模型模拟过程中采用的空间分辨率（栅格大小）。根据熵理论，同一研究区内高的空间分辨率比低的空间分辨率必然包含更多的熵，体现更多的细节信息。本研究区范围较小，模拟过程应选择高的空间分辨率，以尽可能多地反映空间信息。基于 CLUE-S 模型所带示例的默认参数，从 50 m 分辨率（栅格大小为 50 m× 50 m）开始，以 10 m 为步长逐步提高空间分辨率。结果显示，CLUE-S 模型在辛庄镇可运行的最高分辨率为 20 m，包含 946 行、685 列，共 648 010 个栅格。因此，本研究模拟的空间尺度为 20 m。

②时间尺度。本研究预先对 CLUE-S 模型的时间尺度预测能力进行分析，然后确定预测年份。首先分别基于 1980、1991 和 2001 年的土地利用图模拟 2009 年土地利用情况，其预测时间分别为 29、18 和 8 a，然后将模拟结果分别与 2009 年土地利用图（图 3）进行比较分析，基于 kappa 指数和历史重建的方法^[12]，最终确定的适宜模拟时间尺度为 21 a。

4) 土地利用需求模块的设置

CLUE-S 模型中的需求模块是相对独立的，要求将不同需求预案的结果输入模型，以便进行不同的空间分配和模拟，因此需要对不同的土地需求方案进行预测。本研究采用时间序列分析中自回归移动平均模型 ARIMA

和灰色预测模型 GM(1, 1)相结合的方法，对研究区 2010—2030 年各年份的土地利用需求进行预测，得到“目前趋势预案 (CT)”下的需求结果；“城镇规划和基本农田保护预案 (PF)”需求主要依据辛庄镇土地利用总体规划，结合当地资源约束和我国耕地保护政策的双重制约趋势，对 CT 预案进行修正得到；“生态环境保护预案 (EE)”是在对生态水系、湿地和林地等生态涵养区严格保护的基础上，对“城镇规划和基本农田保护预案 (PF)”结果进行修正得到 2010—2030 年的土地利用需求预测结果。

5) 转化强度设定

土地利用类型转化的稳定性（即 ELAS (elasticity) 参数）是指在一定时期内，研究区内某种土地利用类型可能转化为其他土地利用类型的难易程度，是根据区域土地利用系统中不同土地利用类型变化的历史情况以及未来土地利用规划的实际情况而设置的，其值越大，稳定性越高。结合前人经验和本研究区 1980—2009 年土地利用变化特征，最终确定的各地类的 ELAS 值依次为：建设用地 0.9、旱地 0.5、水田 0.4、鱼塘 0.7、林地 0.6 和水体 0.7。

6) 转化规则设定

在 CLUE-S 模型中，要求输入各地类之间的允许转移矩阵。根据研究区景观的历史动态变化，本研究假定所有的土地利用类型之间的转化均可以发生。

2 结果与分析

2.1 辛庄镇未来土地利用变化的时空特征

基于 2009 年辛庄镇土地利用图, 结合上述 CLUE-S 模型参数设置, 分别对 3 种预案下 2010—2030 年土地利用变化进行模拟, 其中 2030 年的模拟结果见图 3, 研究区各土地利用类型面积变化如图 4。从图 3 和图 4 可以看出, 3 种预案下村镇建设用地均呈增长趋势, 其中 CT 预案下建设用地增加最为迅速, 21 年间增加了 $1\,377.34\text{ hm}^2$, 年均增长 68.87 hm^2 。CT 预案下建设呈无序蔓延态势, 对其他用地均有不同程度的侵占, 建设用地的大肆扩张在未来土地利用变化过程中占据主导地位。PF 和 EE 预案下, 由于城镇规划和生态环境保护的空间约束, 建设用地扩展已得到有效控制, 主要是沿着道路两侧和城镇周围的自发式增长, 增幅较小, 年均增长量分别为 23.5 和 12.79 hm^2 。转移矩阵分析表明, 水田是建设用地增加的主要来源, 分别占 CT、PF 和 EE 预案建设用地总增长量的 95.49%、88% 和 99.84%。各预案下, 建设用地增长对鱼塘的侵占面积最小, 因为鱼塘本身产出经济效益较

高, 而且在前期投入大量的人力物力, 所以轻易不转化为其他用地。

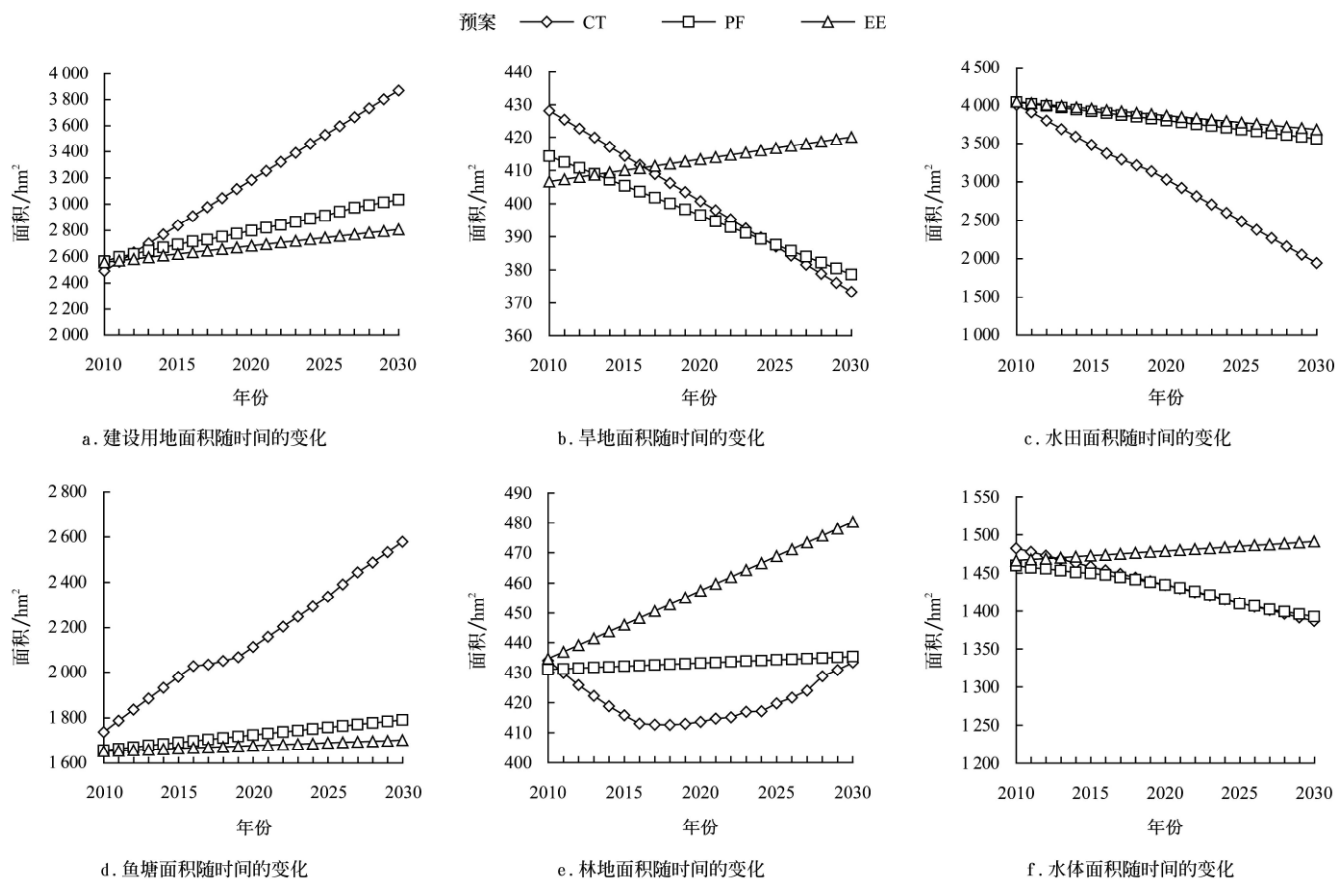
CT 和 PF 预案下旱地均呈逐渐下降趋势, EE 预案对旱地保护较好, 其面积略有增加。CT 预案下水田呈急速减少趋势, 而在 PF 和 EE 预案下只有少量减少, 这是因为辛庄镇总体规划中对基本农田提出了严格的保护措施。CT 预案下鱼塘面积显著增加, 主要是鱼塘的经济价值远高于普通粮食作物, 延续历史趋势必将大幅增加, 随着政府耕地保护政策的出台, 鱼塘的增加已被严格限制, 这在 PF 和 EE 预案下有所体现。CT 预案下林地呈现先下降后上升趋势, 但幅度较小, PF 预案下基本维持平稳, 而在 EE 预案下, 作为生态用地呈现逐渐增加趋势。CT 和 PF 预案下水体均有所减少, 而在 EE 预案下水体得到严格保护, 呈缓慢增加趋势。

总的来说, 在无空间约束的 CT 预案下, 建设用地高速扩展, 林地、水体、耕地等有利于区域生态安全的自然和半自然景观资源将不可避免地被建设用地扩张所吞噬。而在 PF 和 EE 预案下, 建设用地扩展受到一定约束, 上述几类具有重要生态功能的用地将受到更多的保护。



图 3 不同预案下 2030 年研究区土地利用模拟结果

Fig.3 Simulated results of land use of Xinzhuang town in 2030 under different scenarios



注: CT 为目前趋势发展预案; PF 为城镇规划和基本农田保护预案; EE 为生态环境保护预案, 下图同

图4 研究区各土地利用类型面积变化

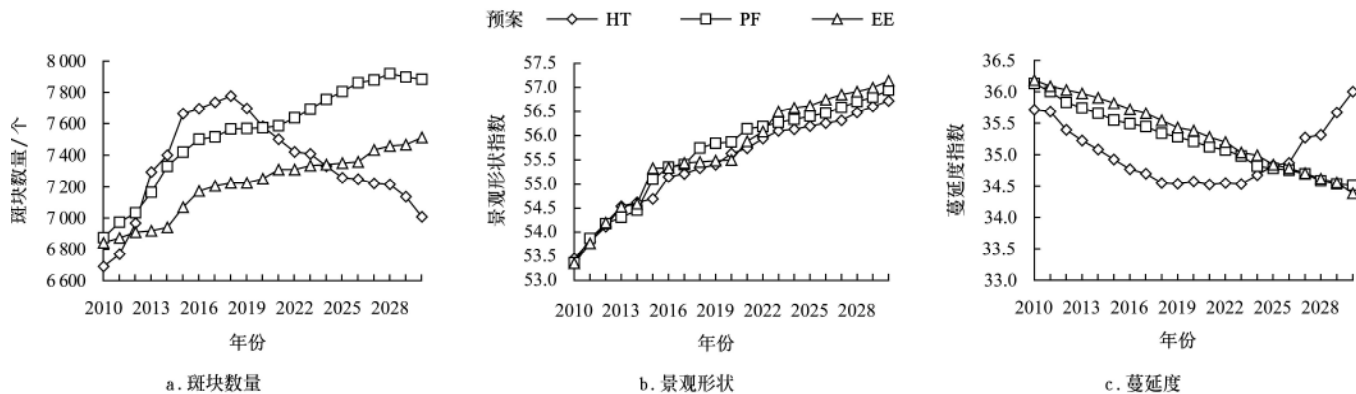
Fig.4 Area change of land use types in the study area

2.2 辛庄镇景观格局变化分析

将模拟的 2010—2030 年土地利用结果转化为 Arcinfo-GRID 格式, 利用景观格局指数方法进行格局变化分析。本研究选择的景观指数包括: 斑块数量 (NP)、景观形状 (LSI)、蔓延度 (CONTAG)、香农多样化 (SHEI)、香农均匀度 (SHDI) 和聚集度 (AI), 应用 Fragstats 软件进行计算。

CT 预案下, NP 呈现先快速上升随后逐渐下降的趋势, 2018 年 NP 达到最大值 7 776, 主要是因为从目前发展趋势下, 未来的建设用地短期内将快速增加, 斑块数量急剧增多, 景观破碎化程度加大, 但随着建设用地的不断扩展, 大量的建设用地斑块连接成片, 所以在 2018

年后 NP 逐渐下降; PF 和 EE 预案下, NP 均呈现逐渐上升趋势, PF 预案下 NP 上升更为快速, 表明这 2 种预案下景观破碎化程度日益加剧。3 种预案下 LSI 均呈增大趋势, 表明研究区整体景观形状日趋复杂, 2022 年前, PF 预案下的 LSI 上升较快, 2022 年后, EE 预案下的 LSI 较大。CONTAG 可以反映景观的连通程度: PF 和 EE 预案下, CONTAG 逐年下降, 这说明辛庄地区景观连通性逐渐降低, 这也反映了景观破碎化程度日益增大; CT 预案下, CONTAG 表现先下降再上升的趋势, 至 2030 年景观连通性明显高于 PF 和 EE 预案下的预测结果, 这主要是由于建设用地不断扩张形成一体, 因而连通性逐渐加大, 这与 NP 所反映的结果相吻合。PF 和 EE 预案下的 SHEI



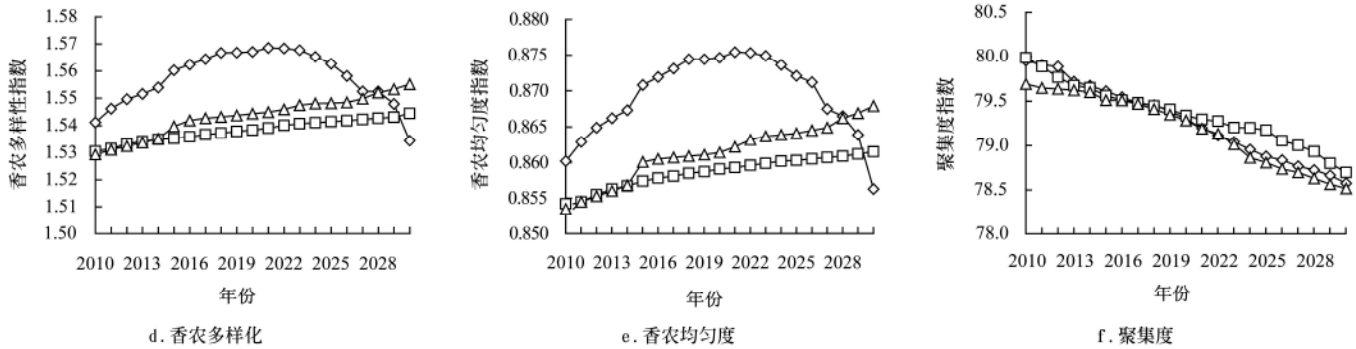


图5 研究区各景观指数的变化

Fig.5 Change of landscape metrics in the study area

和 SHDI 均有增大趋势,说明在此二种预案下研究区景观逐渐向着多样化和均匀化方向发展;CT 预案下这 2 种指数表现为先上升而后逐渐下降,2020 年左右是转折点,这之前,研究区各类型斑块面积有趋同趋势,这之后,建设用地逐渐成为基质景观,其他地类面积不断缩减,变得更加不平衡。3 种预案下 AI 均表现下降趋势,表明优势景观类型对景观整体的控制作用在逐渐降低。

2.3 未来土地利用生态风险分析

本研究选择生态风险指数^[28],用于描述不同预案下未来土地利用变化对区域综合生态安全的影响程度,以便将土地利用结构转化为空间化的生态风险变量,其计算公式如下

$$ER = \sum_{i=1}^n \frac{A_i R_i}{TA} \quad (2)$$

式中, ER 为生态风险指数; n 为土地利用类型的数量,个; A_i 为第 i 种地类的面积, hm^2 ; TA 为研究区总面积, hm^2 ; R_i 为第 i 种地类的生态风险强度参数。 R_i 是根据不同土地类型所反映出的综合生态风险程度,参照前人研究结果和专家咨询法,最终确定为:建设用地 0.91,水体 0.18,林地 0.16,水田 0.31,旱地 0.32,鱼塘 0.35。

由图 6 可以看出,总体上不同预案下土地利用模拟结果的生态风险指数均呈上升趋势,但存在一定差异,且随着时间的推移,差异越发明显。2030 年,CT、PF 和 EE 预案的生态风险指数分别为 0.519、0.463 和 0.450。随着时间的推移,CT 预案的生态风险指数表现为快速增加,而 PF 和 EE 预案表现为缓慢增加。这主要是由于 CT 预案下建设用地持续高速扩张,土地开发强度日益加大,侵占了大量的林地、水体等生态用地,自然生境范围不断缩小,区域生态安全受到威胁;而 PF 和 EE 预案下的城镇集中建设和生态保护约束条件对生态安全起到了良好的效果,生态风险值相差不大。PP 预案下,村镇建设被约束在城镇规划范围内,外围的基本农田、林地和水体等受到严格保护。EE 预案下,进一步加大了对水体和林地等具有重要生态功能用地的保护力度,同时加强了对建设用地增加的总量控制,因此其土地利用生态风险最小。

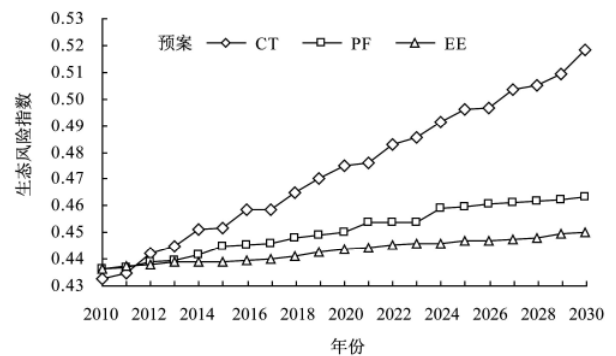


图6 各预案下生态风险的变化

Fig.6 Change of ecological risk under different scenarios from 2010 to 2030

综合来看,在设计的 3 种预案下,建设用地的增加均以消耗大量的耕地资源为代价,斑块较小的林地、水体和鱼塘也不可避免的被建设用地吞并或由于快速的城镇化而转化为其他地类。EE 预案对水体和林地等生态用地具有较好的保护作用,大大降低了城镇化过程导致的生态风险,但城镇发展受到自然资源和生态环境严格约束,景观布局分散复杂,城镇建设用地扩展受到极大限制,2010—2030 年仅增加 250.15 hm^2 ,从生态环境保护的角度是较好的预案,但可能无法满足城镇化进程和社会经济的快速发展及人口增长的需求,此预案可以实现生态环境可持续发展,但无法保证社会经济的可持续发展,因此是不适宜的预案。CT 预案对城镇空间扩展约束程度很小,建设用地快速扩张,其他地类的破碎化程度不断增加,研究区土地利用强度逐渐加大,大量的自然和半自然景观丧失,区域自然生境范围不断缩小,城镇斑块边缘效应显著,区域生态安全受到严重威胁,因此也是一种不可取的发展预案。PF 预案建设用地肆意增加现象得到抑制,大面积的农田得到保护,生态环境所受影响相对较小,而且城镇主要沿着中心城区周围和主要道路两侧扩展,城镇景观日趋紧凑,建设用地相对集中,因此可看作是未来城镇发展一种较为理想和现实的推荐预案,可为当地的城镇总体规划和土地利用总体规划提供一定的科学指导。在实际规划过程中,可以根据政策需要和土地利用需求调整规划预案,实现对城镇土地利用变化的动态规划与管理,以缓解人地矛盾、改善生态

环境和实现区域可持续发展。

3 讨 论

城镇规划和基本农田保护预案虽然相对合理,但也存在一定的不足,虽然它将城镇建设控制在城镇规划和区域开发范围内,但规划区内景观格局破碎化程度相对较大,因此要注意优化城镇空间格局,高效集约地利用有限的土地资源,妥善处理城镇建设、耕地保护和生态保护的关系。此外,对生态保护区的确定和保护范围的划定,可以更多的与土地利用现状、自然和社会经济等数据相结合,应用 CLUE-S 模型进行深入研究,以构建一个社会、经济和生态环境和谐发展的理想预案。

CLUE-S 模型可为区域土地资源的合理分配提供决策依据,为城镇土地利用提供一种切实可行的规划工具,结合遥感和 GIS 等技术,可将决策者和规划专家的政策意图和规划思想融入其中,通过设计不同的限制图层及相关参数,可有效地模拟不同政策和规划预案下的土地利用变化过程,利用动态演示,使模拟结果一目了然,方便政府决策者和规划师从实际出发,完善和筛选最优的规划方案。本文应用 CLUE-S 模型,从不同角度设计的预案和模拟分析结果将对辛庄镇未来的城镇土地利用总体规划和土地资源合理分配提供科学的参考。此外,由于强势的政府干预与城镇化和工业化进程的不断提速,城镇土地利用变化具有明显的不确定性特征,利用 CLUE-S 很难模拟由于政策导向出现的开发区和工业园区等“蛙跳式”的土地利用格局,从而影响模拟精度,降低了预案设计对未来土地利用变化的实际指导意义。未来的研究需要不断改进预案设计和模拟方法,全面考虑土地开发、管理和环境保护等政策对土地利用演变的影响,以提高模型的实践应用效果。

4 结 论

1) 3种预案下,辛庄镇未来一段时期内的土地利用、景观格局和生态风险均发生显著变化,且差异明显。基于区域生态安全、耕地保护和社会经济可持续发展等方面的综合考虑比较,城镇规划和基本农田保护预案更为合理,可作为辛庄镇未来土地利用总体规划的参考预案。

2) 辛庄镇经济发达,社会经济因素对当地土地利用变化具有重要的影响,因此尽可能地选择了较多的社会经济因子。但由于很多以村为单位的社会经济数据的不可得性,必然会降低模型的模拟效果。尽管 CLUE-S 模型利用现有数据的预测效果比较理想,但如果有更完备的数据支持,预测精度将进一步提高。

3) 前人对 CLUE-S 模型的应用研究主要集中在区域和城市等中等尺度,所使用的数据大多是 TM 和 ETM 等中低分辨率的遥感影像。随着高分辨率遥感数据的出现,使该模型在乡镇尺度的模拟预测切实可行且效果良好。本研究表明 CLUE-S 对在小尺度区域具有较强的实践应用性和良好前景。但尺度越小,CLUE-S 模型所需参数越敏感,特别是土地利用转移弹性参数和模型迭代变量设置,要根据历史数据反复调试方可获得最佳模型参数组合。

[参 考 文 献]

- [1] Lambin E F. Modeling and monitoring land-cover change processes in tropical regions[J]. *Progress in Physical Geography*, 1997, 21(5): 375—393.
- [2] Veldkamp A, Lambin E F. Predicting land-use change[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2001, 85(1/2/3): 1—6.
- [3] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570—574.
- [4] 陈佑启, Verburg P H, 徐斌. 中国土地利用变化及其影响[J]. *地理科学进展*, 2000, 19(2): 116—127.
Chen Youqi, Verburg P H, Xu Bin. Spatial modeling of land use and its effects in China[J]. *Progress in Geography*, 2000, 19(2): 116—127. (in Chinese with English abstract)
- [5] 蔡运龙. 土地利用/土地覆被变化研究: 寻求新的综合途径[J]. *地理研究*, 2001, 20(6): 645—652.
Cai Yunlong. A study on land use/cover change: the need for a new integrated approach[J]. *Geographical Research*, 2001, 20(6): 645—652. (in Chinese with English abstract)
- [6] Lambin E F, Rounsevel M D A, Geist H J. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity?[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 82(1/2/3): 321—331.
- [7] Skole D L, Chomentowski W H, Salas W A, et al. Physical and human dimensions of deforestation in Amazonia[J]. *Bioscience*, 1994, 44(5): 314—322.
- [8] 鲁奇, 战金艳, 任国柱. 北京近百年城市用地变化与相关社会人文因素简论[J]. *地理研究*, 2001, 20(6): 688—696.
Lu Qi, Zhan Jinyan, Ren Guozhu. A primary study on urbanization, land use/cover change and the related social-human factors in Beijing in the past 100 years[J]. *Geographical Research*, 2001, 20(6): 688—696. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李巍, 谢德娣, 张杰. 景观生态学方法在规划环境影响评价中的应用: 以大连森林公园东区规划环境影响评价为例[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(6): 605—610.
Li Wei, Xie Dechang, Zhang Jie. Application of landscape ecological method in planning environment impact assessment: A case study for east part of Dalian Forest Park[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(6): 605—610. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘淼, 胡远满, 常禹, 等. 生态保护政策对岷江上游地区土地利用/覆被的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1351—1358.
Liu Miao, Hu Yuanman, Chang Yu, et al. Effects of eco-protection policy on land use/cover in upper reaches of Minjiang River[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(6): 1351—1358. (in Chinese with English abstract)
- [11] 史培军, 宫鹏, 李晓兵, 等. 土地利用/土地覆盖变化研究的方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [12] 刘淼, 胡远满, 常禹, 等. 土地利用模型时间尺度预测能力分析: 以 CLUE-S 模型为例[J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 6110—6119.
Liu Miao, Hu Yuanman, Chang Yu, et al. Analysis of temporal predicting abilities for the CLUE-S land use model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6110—6119. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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.
- [14] Lin Y P, Hong N M, Wu P J, et al. Modeling and assessing

- land-use and hydrological processes to future land-use and climate change scenarios in watershed land-use planning[J]. *Environmental Geology*, 2007, 53(3): 623–634.
- [15] Harms W B. Landscape fragmentation by urbanization in the Netherlands: options and ecological consequences[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1999, 11(2): 141–148.
- [16] Mankin K R. An integrated approach for modeling and managing golf course water quality and ecosystem diversity[J]. *Ecological Modeling*, 2000, 133(3): 259–267.
- [17] Martin J F, White M L, Reyes E, et al. Evaluation of coastal management plans with a spatial model: Mississippi Delta, Louisiana, USA[J]. *Environmental Management*, 2000, 26(2): 117–129.
- [18] 李晓文, 肖笃宁, 胡远满. 辽东湾滨海湿地景观规划预案分析与评价[J]. *生态学报*, 2001, 21(3): 353–364.
Li Xiaowen, Xiao Duning, Hu Yuanman. The analysis and evaluation of landuse scenarios in the Liaohe river Delta wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 353–364. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李晓文, 肖笃宁, 胡远满. 辽河三角洲滨海湿地景观规划预案设计及其实施措施的确定[J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 224–232.
Li Xiaowen, Xiao Duning, Hu Yuanman. The landscape planning scenarios designing and the measures identification in the Liaohe river Delta wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 224–232. (in Chinese with English abstract)
- [20] 俞孔坚. 可持续环境与发展规划的途径及其有效性[J]. *自然资源学报*, 1998, 13(1): 8–15.
Yu Kongjian. The avenue and validation for sustainable development and developing p lanning[J]. *Journal of Natural Resource*, 1998, 13(1): 8–15. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王凌, 李秀珍, 郭笃发, 等. 辽河三角洲湿地以丹顶鹤生境保护为核心的退耕预案研究[J]. *生态学报*, 2004, 24(8): 1708–1717.
Wang Ling, Li Xiuzhen, Guo Dufa, et al. Scenarios study on returning farmland to wetlands for protecting red-crowned cranes in the Liaohe Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1708–1717. (in Chinese with English abstract)
- [22] 郝凤明, 胡远满, 贺红士, 等. 基于 SLEUTH 模型的沈阳—抚顺都市区城市规划[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2009, 26(6): 765–773.
Xi Fengming, Hu Yuanman, He Hongshi, et al. Urban planning based on SLEUTH model in Shenyang-Fushun metropolitan area[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2009, 26(6): 765–773. (in Chinese with English abstract)
- [23] 马荣华, 陈雯, 陈小卉, 等. 常熟市城镇用地扩展分析[J]. *地理学报*, 2004, 59(3): 418–426.
Ma Ronghua, Chen Wen, Chen Xiaohui, et al. Town and construction land growth of Changshu City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 418–426. (in Chinese with English abstract)
- [24] Verburg P H, Eickhout B, Maijl H. A multi-scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of European land use[J]. *The Annals of Regional Science*, 2008, 42(1): 55–57.
- [25] Gobim A, Campling P, Feyen J. Logistic modeling to derive agricultural land determinants: a case study from southeastern Nigeria[J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2002, 89(3): 213–228.
- [26] Gabriela B, Lambin E F. Fire impact on vegetation in Central Africa: a remote-sensing-based statistical analysis[J]. *Applied Geography*, 2002, 22(1): 27–48.
- [27] Pontius J, Laura C S. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 85(1/2/3): 239–248.
- [28] 曾辉, 刘国军. 基于景观结构的区域生态风险分析[J]. *中国环境科学*, 1999, 19(5): 454–457.
Zeng Hui, Liu Guojun. Analysis of regional ecological risk based on landscape struncture[J]. *China Environment Science*, 1999, 19(5): 454–457. (in Chinese with English abstract)

Scenarios simulation of town land use change under different spatial constraints

Zhou Rui^{1,2}, Su Hailong^{1,3*}, Hu Yuanman², Li Yuehui², Liu Miao²

(1. *Urban Planning and Development Research Center, Fudan University, Shanghai 200433, China;*

2. *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*

3. *Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)*

Abstract: The purpose of the paper is to study the land use change under different scenarios of Xinzhuang Town in the future decades. Based on land-use historical data extracted from four periods high-resolution remote sensing images of Xinzhuang Town, integrated with GIS spatial analysis technology, three scenarios were designed: 1) current trend (CT), 2) urban planning and basic farmland protection (PF), 3) ecological and environmental protection (EE), under current land-use trend, farmland protection and ecological safety, to make different spatial constraints. The CLUE-S model was used to forecast land use change in the next 20 years of Xinzhuang Town under different scenarios, and the spatio-temporal characteristics, spatial pattern and ecological risks of different modeling results were compared. The results showed that Xinzhuang Town would be faced with continuous construction land increasing, and the scenario CT would be the most significant, and a large amount of farmland would be lost under all scenarios. But the land use change characteristics, landscape pattern and ecological security showed obvious differentiation under different scenarios. It is concluded that the scenario PF is the recommended future land use change scenario from comprehensively compared results. Simulation results of CLUE-S model can reflect future land use change and potential ecological risk of different constraints, and the scenario design and spatial modeling method of CLUE-S model will be useful for decision-making of land use plan.

Key words: land use, models, ecology, space constraints, CLUE-S, scenario design

周 锐，等. 不同空间约束条件下的城镇土地利用变化多预案模拟(图3)

Zhou Rui, et al. Scenarios simulation of town land use change under different spatial constraints (Figure 3)

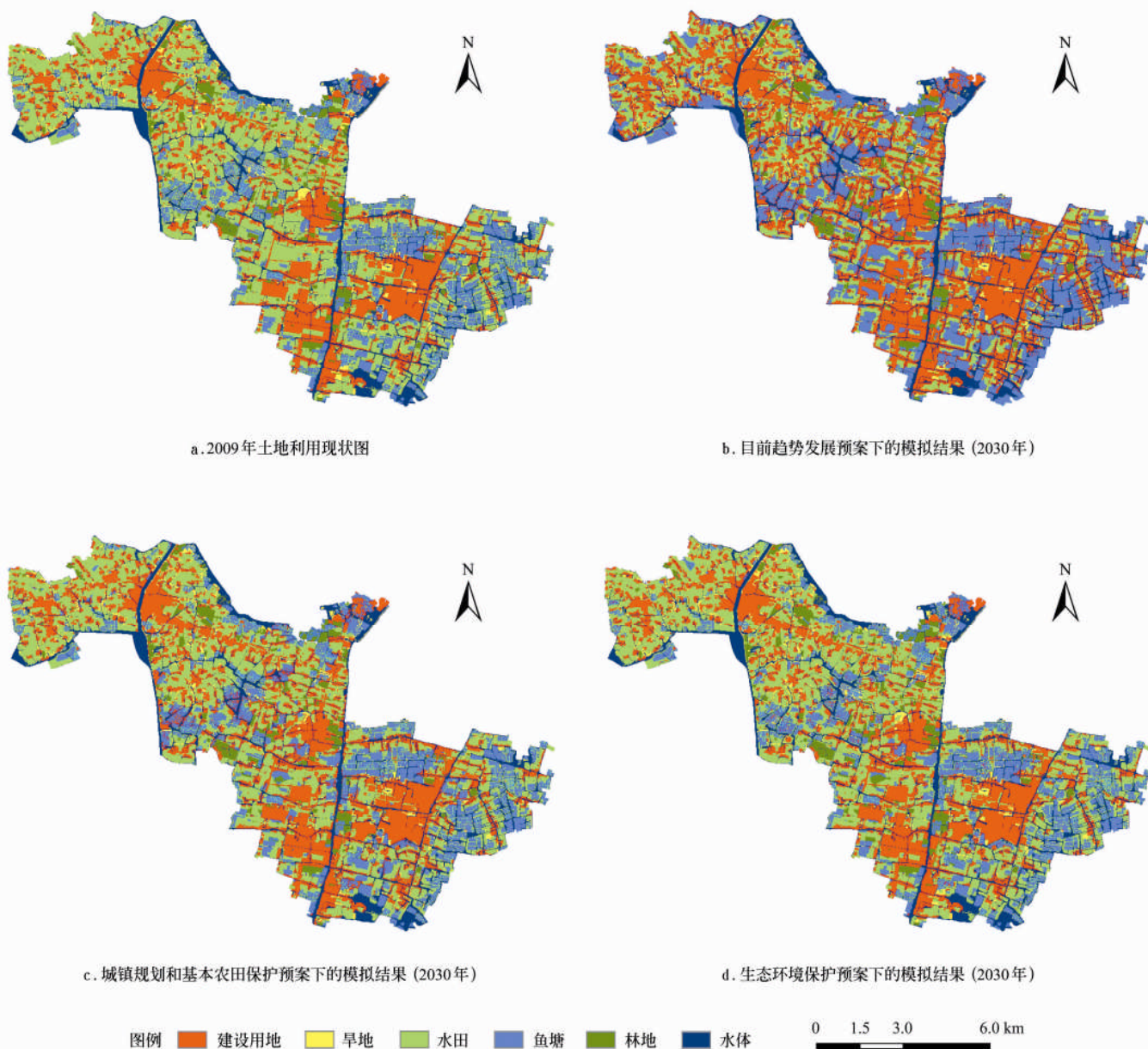


图3 不同预案下2030年研究区土地利用模拟结果

Fig.3 Simulated results of land use of Xinzhuang town in 2030 under different scenarios