

# 汾河源头区域土地利用及生境质量 时空演变的多情景模拟

和娟, 师学义, 付扬军, 张燕

(中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

**摘要:**土地利用变化及生境质量服务的多情景模拟对制定区域差别化的生态保护和耕地保护政策具有重要的意义。以汾河源头区域为例,借助 Logistic-CA-Markov 耦合模型,对土地利用转移情况、影响因子和未来变化趋势进行了多情景模拟分析,然后运用 InVEST 模型分析土地利用变化对生境质量带来的影响。结果表明:不同驱动因子的解释能力具有差异,11 个驱动因子整体解释效果较好,ROC 值都在 0.85 以上;自然发展情景、生态保护情景、耕地保护情景下 6 种地类的变化方向、生境演变特征均有所不同;2017—2030 年自然发展情景、生态保护情景、耕地保护情景生境质量分别为 0.78,0.76,0.81,0.72;不同情景下的生境质量结果均表明随着海拔和坡度的升高,生境质量也不断得到提高,但是同一海拔和坡度下不同情景生境质量的变化具有差异。

**关键词:**土地利用;生境质量;Logistic-CA-Markov;生境贡献率;InVEST 模型;汾河源头区域

**中图分类号:**F301.24, X821

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)05-0250-09

## Multi-Scenario Simulation of Spatiotemporal Evolution of Land Use and Habitat Quality in the Source Area of Fenhe River Basin

HE Juan, SHI Xueyi, FU Yangjun, ZHANG Yan

(School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The multi-scenario simulation of land use change and habitat quality is of great significance for the formation of different ecological protection and farmland protection policies. Taking the source area of Fenhe River Basin as an example, we established a multi-scenario simulation of land use transfer, influencing factors and future land use change with the Logistic-CA-Markov coupling model. Then the InVEST model was used to analyze the impact of land use change on habitat quality. The results showed that the interpretation ability of different driving factors was different, 11 driving factors all had better overall interpretation effect, and the ROC values were all above 0.85; the change direction and habitat quality of six land types were different under three scenarios; from 2017 to 2030, the habitat quality index of natural development scenario, ecological protection scenario and farmland protection scenario were 0.78, 0.76, 0.81 and 0.72, respectively; the habitat quality improved with the increase of altitude and slope, but the changes of habitat quality in different scenarios were different at the same altitude and slope gradient.

**Keywords:** land use change; habitat quality evaluation; Logistic-CA-Markov; habitat contribution rate; InVEST model; source area of Fenhe River Basin

生境质量指生态环境能够为个体、种群或群落的持续生存与发展提供适宜条件的能力<sup>[1]</sup>,在一定程度

上反映区域内生物多样性的丰富程度<sup>[2]</sup>,关乎人类福祉。生物多样性是重要的战略资源,也是实现绿水青

收稿日期:2019-11-08

修回日期:2019-11-28

资助项目:国土资源部公益性行业科研专项经费课题“北方村庄压煤山丘区土地综合整治技术研究”(201411007)

第一作者:和娟(1995—),女,山西晋城人,硕士研究生,主要从事土地利用评价与规划,生态保护与修复方面的研究。E-mail:joann0214@163.com

通信作者:师学义(1960—),男,山西祁县人,博士,教授,主要从事土地利用评价与国土空间规划,生态保护与修复方面的研究。E-mail:shixueyi60@163.com

山的重要前提。生境质量的优劣决定了生态系统的平衡性与社会—经济—自然复合系统的可持续发展<sup>[3]</sup>。但是精确定量评估生境质量仍存在诸多难题,国内外学者大多借助多源数据来构建综合模型评价区域生境质量的优劣程度<sup>[4-6]</sup>。相关研究表明,随着生态用地向非生态用地的转变,适合生物生存和繁衍的生境不断减少,造成生境趋于破碎化、生境功能退化甚至丧失<sup>[7-8]</sup>,在一定程度干扰了生境斑块间的物质流及能量流循环过程<sup>[9]</sup>,进而影响生境分布格局和功能<sup>[10]</sup>。生境面积的破碎化、生境质量的降低以及人类活动的加剧,使生物多样性保护工作面临极大的挑战<sup>[11]</sup>。因此,为了深化对生物多样性保护的重要性认识,有必要定量评估多年来区域生境质量的变化,以及在未来的发展中如何平衡生态保护与社会经济发展中资源匮乏的矛盾,对保护生态环境及合理利用自然资源具有重要的意义。

目前关于生境质量与土地利用的研究,大多是通过构建影响生境评价的相关指标来评估生境质量<sup>[12-13]</sup>,指标包括生物物种丰富程度、植被类型、地形指标、水质以及反映人类活动密集的社会经济指标等<sup>[14-16]</sup>。该方法的优点在于较全面地覆盖了评价目标及研究问题的各个方面,单个指标对综合评价的反映较灵敏以及部分指标之间具有可比性等,但是缺点就在于对指标的数量要求较多,数据获取难度较大以及指标冗余对评价结果造成的不利影响。而 InVEST 模型中的 Habitat Quality 模块对数据的要求相对较少,评价结果也支持空间可视化表示<sup>[17]</sup>,可反映区域生境分布以及生境退化的状况<sup>[18]</sup>,因此得到了许多国内外学者的关注与青睐。近些年来国内外学者在不同区域、多个尺度、不同地貌类型均进行了深入研究<sup>[19-21]</sup>,为评价区域生物多样性和生态保护规划提供了重要的科学依据。目前许多学者已经开展了许多土地利用情景模型和相关模拟的研究,但是生境质量服务对多情景模拟下的土地利用变化的响应还比较少,因此在分析当前生态安全状况的同时,有必要对生境质量进行情景模拟和预测。

考虑到黄土丘陵沟壑区是退耕还林工程的重要实施区域,土地利用变化促进了产业结构调整,对改善区域生态环境以及提高生物多样性具有至关重要的作用。此外,根据《山西省生态功能区划》,汾河源头区域被定位为水源涵养与生物多样性保护生态功能区。鉴于此,本文选择宁武县和静乐县作为研究区域,基于 2000—2017 年的土地利用数据,借助 Logis-

tic-CA-Markov 模型,设置自然发展、生态保护、耕地保护 3 种不同的情景,对未来土地利用进行模拟预测,并分析不同情景下生境质量的变化情况。

## 1 研究区概况

研究区为汾河源头区域,包括宁武县和静乐县两个县,地处黄土高原东部、山西省北部、忻州市中部,是山西省“母亲河”汾河的发源地,地理坐标位于 111°42′43″—112°36′55″E,38°7′57″—39°8′41″N,国土总面积近 4 000 km<sup>2</sup>;区域地形复杂,海拔高度差异很大。该区域是山西省生物多样性的重点保护区,生物资源种类繁多,南北差异较大,以针叶林及中生的落叶灌丛为主,是森林分布面积较大的地区。区域内野生动物大多为陆栖类动物,其中国家一级保护动物有褐马鸡、黑鹳、白鹳、金钱豹等,国家二级保护野生动物兔狲、马鹿、天鹅等。同时也是中国华北平原的重要生态屏障,对调节区域气候、改善空气质量及提升生态环境功能具有不可替代的作用。但是另一方面,研究区为典型的黄土丘陵沟壑区,黄土质地疏松,加之雨季多集中在 7—8 月份,在强降雨对地表的严重冲刷下,导致地表破碎,沟壑纵横,生态环境十分脆弱。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究使用的主要数据包括遥感影像数据、DEM 数据、气象站点数据、土壤数据、社会经济统计数据等。选取 2000 年、2010 年、2017 年 3 个时段的 Landsat TM/ETM 遥感影像(像元大小 30 m×30 m,轨道号为 12 633),来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),时相为 5—9 月,在 ENVI, ArcGIS 等软件的支持下,结合研究区土地利用类型特征,采用人机交互解译的方法获取研究区土地利用数据。结合研究区第二次土地调查数据和年度变更调查数据验证解译精度,三期遥感影像解译精度均达到 80% 以上,可以满足本次研究的需要。土地利用类型分为耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地。

DEM 数据(像元大小 30 m×30 m),来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),用来提取海拔、坡度和坡向等地形因子。气象数据来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>),从研究区周围多个气象站点的月均数据库中提取降水量(像元大小 1 000×1 000)。土壤数据来源于中国土壤数据集(<http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HT->

ML/),提取土壤质地数据(像元大小  $1\ 000\times 1\ 000$ )。社会经济数据通过查询宁武县和静乐县统计年鉴获得人口密度和人均 GDP 数据,利用 ArcGIS 软件进行空间可视化表示。为便于空间数据的处理与分析,本研究所有数据均转换为统一的坐标及投影系统,即 CGCS2 000 国家大地坐标系。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 土地利用情景的设置** 根据研究区土地利用特点及用地需求,结合《宁武县土地利用总体规划》、《静乐县土地利用总体规划》,通过不断的调试 Markov 模型的转移概率以及转变适宜性图集,预测不同情景下 2030 年研究区的土地利用类型的数量及空间分布变化。

**情景 1:自然发展情景。**根据 2010—2017 年土地利用转移概率矩阵以及适宜分布概率,以 2017 年土地利用现状数据为底图,基于 CA-Markov 模型预测 2030 年在自然发展情景下各土地利用类型的面积及空间分布。

**情景 2:生态保护情景。**研究区为黄土丘陵区重要的退耕还林区域,也是华北平原生态屏障的核心区。为了进一步巩固退耕还林的成果,未来的土地利用要进一步加强生态用地的保护。在该情景的设置中,林地、草地、水域向建设用地和未利用地的转移概率降低 100%,耕地向林地的转换概率增加 30%;此外要严禁生境退化,将区域自然保护区、国家森林公园、高山湖泊群、地质公园等作为约束条件,限制生态用地的任意转换。

**情景 3:耕地保护情景。**耕地是粮食安全的载体,该区域为重要的农业开发县,该情景是为保护耕地设置。一方面,基本农田区范围内的耕地严禁转出,将其作为约束条件;另一方面,修正转移概率,将耕地向建设用地和未利用地的转移概率分别降低 90% 和 100%,向林地、草地、水域的转移概率降低 30%。

**2.2.2 Logistic-CA-Markov 模型及参数设置** Logistic 回归模型是解释自变量和因变量的关系和强度的空间模型,目前已被广泛地应用在土地利用变化的研究中。本文选择 ROC 曲线法检验空间 Logistic 模型的预测结果,ROC 曲线下面积介于 0.5~1.0,表明模型的可信度较高。其基本拟合方程<sup>[22]</sup>为:

$$\text{LOG}\left[\frac{P_i}{1-P_i}\right]=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\dots+\beta_nX_n \quad (1)$$

式中: $P_i$  为每一个栅格可能出现某种地类  $i$  的概率;

$X$  为备选驱动因子。

CA-Markov 模型的结合能够全面考虑自然和人文因素的影响,实现土地利用变化的动态模拟,使之既能模拟复杂系统空间变化的能力,也能发挥土地利用需求长期预测的优势。本文的元胞空间为汾河源头区域,元胞的状态为 6 种地类。借助 Logistic 回归诊断每一个栅格单元可能出现某种地类的概率,从而选择对土地利用变化影响较大的因子以及它们之间的定量关系与相互作用关系。

模型需要输入相关参数,数据处理如下:(1) 运用 Markov 模型分析 6 种土地利用类型转换矩阵和转移状态概率。(2) 驱动因子选取。考虑到指标的空间均衡性以及数据的可获取性,在提出相关性显著指标的基础上,本文选取海拔、坡度、坡向、土壤类型、距城镇的距离、距农村居民点的距离、距河流系统的距离、距道路的距离、年降水量、人口密度和人均 GDP 因子。(3) 分布概率适宜图:以 6 种土地利用变化数据为自变量,11 个空间化的驱动因子为因变量,运用 IDRISI 17.0 软件制作 6 种土地利用类型的适宜分布概率。(4) 地类转换规则设置。其中,自然发展情景不设置转化规则,按照默认  $5\times 5$  邻域转化;生态保护情景仅允许生境正向演替;耕地保护情景禁止耕地的转出,但是允许生境的逆向演替。

**2.2.3 生境质量模型** 生境质量指在生态系统为个体、种群、群落等提供生存繁衍所需条件的潜力。生境质量优劣与生物多样性的丰富程度呈正相关。InVEST 模型假定生境质量是连续的,且在一定程度上生境质量的空间分布与生物多样性的空间分布基本具有一致性。因此本文运用 InVEST 模型中的生境质量模块评估,从外界威胁因子(表 1)和生境敏感性来评价生境质量的优劣<sup>[23]</sup>。

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^R\sum_{y=1}^{y_r}(W_r/\sum_{r=1}^RW_r)r_yi_{rxy}\beta_xS_{jr} \quad (2)$$

式中: $D_{xj}$  为土地覆被类型  $j$  栅格  $x$  的生境退化度; $R$  为威胁因子数量; $y_r$  为  $r$  威胁栅格图上的一组栅格; $W_r$  为威胁因子权重; $r_y$  为栅格  $y$  的威胁因子值; $\beta_x$  为威胁因子可达性; $S_{jr}$  为生境类型  $j$  对威胁因子  $r$  的敏感性。 $i_{rxy}$  为生境类型栅格  $x$  与  $y$  的距离函数(包括指数衰减函数和线性衰减函数),计算公式为:

$$i_{rxy}=1-(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}}) \quad (3)$$

$$i_{rxy}=\exp((-\frac{2.99}{d_{r\max}})d_{xy}) \quad (4)$$

式中: $d_{xy}$  为栅格像元  $x$  与  $y$  间的距离; $d_{r\max}$  为威胁  $r$  的最大威胁距离。

在 InVEST 模型中用  $Q_{xj}$  表示生境质量指数:



$$Q_{xj}=H_j\left[1-\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}\right]$$
 (5)

式中: $H_j$  为土地覆被类型  $j$  的生境适宜性; $k$  和  $z$  为比例因子,其中  $k$  为半饱和常数, $z$  为归一化常量。

2.2.4 土地利用变化类型的生境贡献率 土地利用变化类型对生境贡献率指某类土地利用发生变化使生境质量发生改变的比率。以 2017 年的生境质量指数为基期年,分析不同情景下生境质量指数的变化和土地利用变化对生态质量服务的贡献率,其表达式<sup>[24]</sup>为

$$Q_{LH}=(Q_{H,t+1}-Q_{H,t})\times L/S$$
 (6)

式中: $Q_{LH}$  为土地利用变化的生境贡献率; $Q_{H,t+1}$ ,  $Q_{H,t}$  分别为某种土地利用类型在变化初期和末期土地利用类型的生境质量指数; $L$  为该变化类型的面积( $\text{km}^2$ ); $S$  为土地利用总面积( $\text{km}^2$ )。

表 1 威胁因子属性

威胁因子	最大影响距离/km	权重	衰减方式
农田	1	0.6	线性
道路	5	0.5	线性
城镇	7	0.8	指数
村庄	3	0.4	指数
独立工矿	8	0.6	线性
综合生态风险源	4	1	指数

表 2 汾河源头区域逻辑回归结果及 ROC 检验值

变量	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
$X_1$	-0.0031268	0.0055090	-0.0014725	-0.0023334	-0.0002838	0.0032115
$X_2$	-0.0669834	0.0543234	0.0171346	-0.0487197	-0.0781638	0.0270467
$X_3$	-0.0020083	0.0013065	0.0007437	0.0014694	0.0000415	0.0002967
$X_4$	0.0000340	-0.0000221	-0.0000106	0.0000412	0.0000351	0.0000046
$X_5$	0.0000634	-0.0000341	0.0000085	0.0000035	-0.0000648	-0.0000988
$X_6$	-0.0012807	0.0010124	0.0002365	0.0001531	-0.0016961	0.0000898
$X_7$	0.0001979	0.0001392	-0.0001777	0.0465221	0.0000211	-0.0002294
$X_8$	-0.0000028	0.0000439	-0.0000231	-0.0000303	-0.0001873	-0.0001242
$X_9$	0.0021276	-0.0007007	-0.0026024	0.0016174	0.0049660	0.0121434
$X_{10}$	-0.0008774	0.0005498	0.0001291	0.0036116	-0.0004225	-0.0058406
$X_{11}$	-0.0047635	-0.0112053	0.0117972	-0.0040834	-0.0035533	-0.0435141
ROC	0.921	0.960	0.876	0.991	0.922	0.894

注: $X_1$ :海拔; $X_2$ :坡度; $X_3$ :坡向; $X_4$ :土壤类型; $X_5$ :距城镇的距离; $X_6$ :距农村居民点的距离; $X_7$ :距河流水系的距离; $X_8$ :距道路的距离; $X_9$ :人均 GDP; $X_{10}$ :年降水量; $X_{11}$ :人口密度。

3.1.2 土地利用模拟结果验证 为了验证模型的模拟结果,基于 IDRISI 软件中的 CA-Markov 模块,以 2010 年为基期年,利用 2000—2010 年的土地利用转移面积和概率矩阵,通过 Logistic 回归模型获得 2000—2010 年土地利用变化的转移适宜性图集,从而模拟 2017 年的土地利用的空间分布情况,并将其与 2017 年真实的土地利用分布数据相比较,以验证 CA-Markov 模型模拟的可靠性。经检验,Kappa 系数为 0.835,精度较高,说明 CA-Markov 模型参数设置较合理,可用来模型未来

3 结果与分析

3.1 Logistic-CA-Markov 模型的精度验证

3.1.1 土地利用驱动因子分析 在剔除相关性指标和以及考虑到指标的可获取性的基础上,本文从自然条件和社会经济等角度选取 11 个驱动因子,分别为海拔、坡度、坡向、土壤类型、距城镇的距离、距农村居民点的距离、距河流水系的距离、距道路的距离、年降水量、人口密度和人均 GDP 因子。利用 Logistic 模型,分别计算了影响 6 种土地利用类型空间分布的 11 个驱动因子的回归系数。然后选择 ROC 曲线法检验 Logistic 模型的精度。ROC 值介于 0~1.0,若 ROC 值在 0.5~1,则说明模型具有很好的预测能力;相反如果 ROC<0.5,说明构建的 Logistic 模型不具有预测功能。从表 2 中可以看出,6 种土地利用类型的回归中的 ROC 值都在 0.85 以上,表明本文所构建的回归模型具有可信性,11 个驱动因子具有很好的解释能力。耕地的分布概率与海拔、坡度、人口密度呈较强的负相关关系;随着坡度和海拔的增加,林地的分布面积也增大;坡度与草地的分布概率呈较强的正相关关系,与水域和建设用地呈较强的负相关关系,皆与实际情况相符,表明模型可信度较高。

的土地利用空间分布情况(图 1)。

3.2 土地利用变化分析

3.2.1 2000—2017 年土地利用变化 2000—2010 年和 2010—2017 年的土地利用转移矩阵见表 3 和表 4。汾河源头区域土地利用类型多以耕地、林地、草地为主。2000 年、2010 年、2017 年 3 种土地利用类型分别占总面积的 96.01%,95.53,94.99%,在《山西省生态功能区划》中该区域被定位为管涔山汾河源头水源涵养与生物多样性保护生态功能区和汾河上游

水库调蓄与生物多样性保护生态功能区,另一方面也可以看出该区域近 20 a 来建设用地扩张十分缓慢,间接反映出了该区域贫困程度之深。随着退耕还林工程的实施,2 个时期耕地均呈减少趋势,在退耕还林的第一个阶段(2000—2010 年),耕地面积减少了 10.91%,草地减少了 9.39%,林地增加了 41.84%。林地的转入面积(302.84 km<sup>2</sup>)主要来自于耕地(8.67 km<sup>2</sup>)和草地(293.73 km<sup>2</sup>)。耕地的转出面积(385.23 km<sup>2</sup>)多于转入面积(266.03 km<sup>2</sup>),主要流向草地(364.10 km<sup>2</sup>)、林地(8.67 km<sup>2</sup>)以及建设用地(12.30 km<sup>2</sup>)。草地的转出面积(563.98 km<sup>2</sup>)是转入面积(373.05 km<sup>2</sup>)的 1.5 倍,且有 97.60%流向耕地。

随着退耕还林工程第 2 个阶段(2010—2017 年)的实施,耕地面积继续减少,林地面积不断得到补充。耕地转出面积(382.08 km<sup>2</sup>)主要流向了林地(24.39 km<sup>2</sup>)、草地(321.11 km<sup>2</sup>)和建设用地(35.94 km<sup>2</sup>),大于转入面积(361.56 km<sup>2</sup>)。林地的转入面积(270.25 km<sup>2</sup>)是转出面积(140.1 km<sup>2</sup>)的 1.93 倍,转入面积主要来源于耕地(24.39 km<sup>2</sup>)、草地(245.29 km<sup>2</sup>),转出面积

主要流向耕地(39.90 km<sup>2</sup>)、草地(94.46 km<sup>2</sup>)。建设用地在这一时期为大幅扩张趋势,增长了 73.30%,转入面积为 63.09 km<sup>2</sup>,主要是耕地(35.94 km<sup>2</sup>)和草地(20.40 km<sup>2</sup>)的转入贡献。未利用地转出面积(5.05 km<sup>2</sup>),向耕地(1.63 km<sup>2</sup>)、林地(0.22 km<sup>2</sup>)、草地(2.74 km<sup>2</sup>)、建设用地(45.32 km<sup>2</sup>)流向。

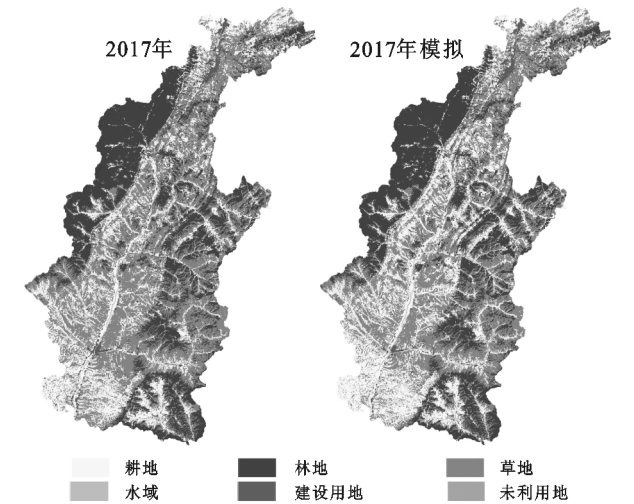


图 1 汾河源头区域 2017 年土地利用现状图和模拟图

表 3 2000—2010 年土地利用转移矩阵

类型		2010 年						总计
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2000 年	耕地	707.10	8.67	364.10	0.16	12.30	0.00	1092.33
	林地	5.87	684.52	5.43	0.00	0.31	0.00	696.13
	草地	257.40	293.73	1468.55	0.44	12.41	0.00	2032.52
	建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	56.95	0.00	56.95
	水域	0.16	0.00	0.02	80.04	0.00	0.00	80.22
	未利用地	2.60	0.44	3.50	0.00	0.51	14.71	21.77
	总计	973.14	987.36	1841.59	80.64	82.48	14.71	3979.92

表 4 2010—2017 年土地利用转移矩阵

类型		2017 年						总计
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2010 年	耕地	611.06	24.39	321.11	0.64	35.94	0.00	993.14
	林地	39.90	847.16	94.46	0.41	5.33	0.00	987.27
	草地	311.14	245.29	1264.39	0.35	20.40	0.00	1841.57
	水域	0.05	0.00	0.00	79.65	0.96	0.00	80.66
	建设用地	8.84	0.35	7.74	0.30	45.32	0.00	62.55
	未利用地	1.63	0.22	2.74	0.00	0.46	9.66	14.71
	总计	972.62	1117.42	1690.46	81.36	108.40	9.66	3979.92

3.2.2 不同情景下土地利用变化 2030 年未来 3 种情景的土地利用类型空间分布如图 2 所示。研究区地势为周边群山向汾河川沟谷倾斜的中间地带,丘陵起伏、沟壑纵横,总体呈现“两山夹一川”大格局,以芦芽山、云中山为两翼,以汾河川为中心从南到北贯穿整个区域。林地多集中连片分布在地势较高,人迹罕

至的区域,耕地和草地分布范围较广,多分布在河川谷地。建设用地分布不均,多沿树枝状水系分布,在地势较低、平地较多,靠近的河流的地方,居住人口较多,建设用地密度较大。从 2030 年未来 3 种情景的发展趋势和空间分布来看,情景 1 中在无约束和人为干预条件下,从 2017—2030 年,建设用地扩张较为明

显,到 2030 年建设用地面积达到 145.161 km<sup>2</sup>,耕地、草地和未利用地都有不同程度的减少,表明经济的增长在一定程度上限制了其他土地利用类型的增长。林地虽然保持增长趋势,但是增长率较小,仅增加了 9.56%。按生态保护型的情景 2 发展趋势来看,到 2030 年林地的空间分布会在原有的分布上以管涔山、云中山为主向外延伸,此时林地面积达到最大,为 1 262.434 km<sup>2</sup>,若未来继续实施退耕还林及生态保护工程,限制建设用地的盲目扩张,不得通过转变生态用地的用途来增加建设用地的面积,林地的实际面积可能会更大。耕地得到大幅度地减少,尤其是沟谷和汾河川周边的耕地。生态保护政策对改善生态环境和维护生态平衡起着重要的保护作用。在耕地保护型情景 3 中,严禁对基本农田的占用,尽最大可能限制现有耕地的转出和保护农用地,耕地较为细碎,多分布在汾河川两岸、河谷区以及地势较平坦的地区等,到 2030 年耕地面积达到了 1 268.51 km<sup>2</sup>,比 2017 年增加了 29.14%。耕地的增加以林地、草地以及水域等减少为代价。

根据 2017—2030 年的土地利用变化数据以及生境贡献率的公式,得到土地利用变化对生境质量影响的贡献率(表 5)。提高汾河源头区域生境质量的土地利用转移主要发生在耕地转草地,3 种情景的贡献率分别达到 1.609,1.168,0.958,其他用地转林草地

也对生境质量的提高具有积极的意义。在情景 1 和情景 3 中,草地转耕地很大程度上降低了生境质量,情景 3 更为显著。2017—2030 年土地利用转移运用桑基图来表示,自然发展型情景 1,主要表现为草地转耕地、耕地转草地、林地转草地、草地转林地,分别转移了 159.91 km<sup>2</sup>,137.33 km<sup>2</sup>,108.19 km<sup>2</sup>,94.52 km<sup>2</sup>。生态保护型情景 2,主要为耕地向林草地的转移和草地向林地的转移,耕地转给草地 100.12 km<sup>2</sup>,转林地 57.39 km<sup>2</sup>,另外,草地转林地 88.06 km<sup>2</sup>。耕地保护型情景 3 主要表现为,351.41 km<sup>2</sup>的草地转给耕地,90.39 km<sup>2</sup>的林地转为草地,18.98 km<sup>2</sup>的林地转给耕地。总体来看,由于水域、建设用地以及未利用地的分布面积较小,土地利用之间的转移主要发生在林地、草地和耕地。

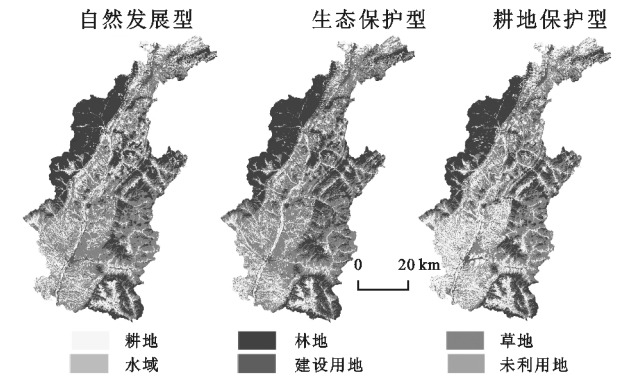


图 2 2030 年汾河源头区域 3 种情景下土地利用模拟结果

表 5 2030 年 3 种情景土地利用转移类型及生境贡献率

土地利用类型变化	情景 1		情景 2		情景 3	
	变化面积/km <sup>2</sup>	贡献率/%	变化面积/km <sup>2</sup>	贡献率/%	变化面积/km <sup>2</sup>	贡献率/%
草地转耕地	159.909	−1.946	—	—	351.406	−4.215
草地转建设用地	14.070	−0.312	—	—	6.737	−0.148
草地转林地	94.517	0.273	88.061	0.250	0.999	0.003
耕地转草地	137.327	1.609	100.118	1.168	82.476	0.958
耕地转建设用地	20.943	−0.227	—	—	3.302	−0.035
耕地转林地	9.521	0.135	57.386	0.812	—	—
林地转草地	106.069	−0.248	—	—	90.392	−0.220
林地转耕地	9.790	−0.146	—	—	18.975	−0.281
林地转建设用地	1.692	−0.042	—	—	—	—
水域转草地	2.395	0.001	—	—	2.664	0.001
水域转建设用地	7.927	−0.176	—	—	3.932	−0.087
未利用地转建设用地	0.118	−0.001	—	—	—	—
未利用地转林地	0.116	0.002	—	—	0.005	0.001

3.3 生境质量变化分析

3.3.1 生境演变特征分析 生态系统存在普遍的空间异质性,不同土地利用类型的生态效益具有显著差异。生境是区域地形地貌、气候、水文、土壤和植被的综合体,生态环境和土地利用类型的变化会使生境发生演替,因此生态系统的变化以及演替方向在一定程度上可以运用土地利用变化来表示。研究区主要的土地利用类型以耕地、林地和草地为主,人为干扰程度较小。

土地利用类型的生态效益从大到小依次为林地、草地、耕地、水域、未利用地、建设用地。本文将林地向草地、耕地的转变定义为植被的逆向演替,反之为植被的正向演替。其他用地向建设用地的转变定义为向人工地表逆向演替,建设用地向其他用地的转变为人工地表正向演替。分别将 2030 年 3 种情景的土地利用类型空间分布与 2017 年作比较,得到 2017—2030 年的 3 种生境演替模式。从图 3 可知,按自然发展型的情景模式



发展,土地利用类型之间的转换较为频繁,4 种生境演替模式均存在,植被正向演替占全域总面积的 6.17%,植被逆向演替占 6.94%,人工地表正向及逆向演替分别占 0.01%,1.13%。对于生态保护情景,耕地、草地向林地转化,退耕还林还草效果较显著,研究区均为植被正向演替,占总面积的 6.19%。按耕地保护情景发展,则大多区域会发生植被逆向演替,占总面积的 11.59%,植被正向演替占 2.36%,向人工地表逆向演替也会发生,仅占 0.35%。从空间分布来看,正向演替大都分布在高山陡坡区域,逆向演替发生在河谷两岸以及人口较密集的区域。人类的活动会在很大程度上干扰生境的变化。

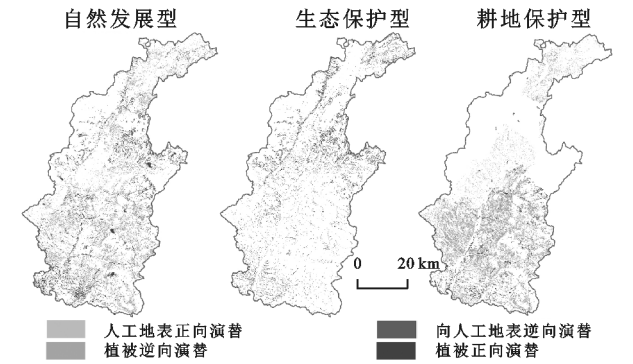


图 3 汾河源头区域 3 种情景下生境演替空间分布

3.3.2 生境质量对土地利用变化的响应 运用 InVEST 模型的生境质量模块,得到 2017—2030 年的生境质量的空间分布。2017 年的生境质量指数为 0.78,到 2030 年自然发展情景、生态保护情景、耕地保护情景生境质量分别为 0.76,0.81,0.72。很明显,研究区总体上生境质量较高,均能达到 70%以上,2030 年生态保护情景的发展生境质量最高,耕地保护情景发展质量较低。若不加以正确引导和改变土地利用方式,研究区生境质量会在一定程度上降低。此外,盲目开垦荒地或毁林开荒等,不仅破坏了退耕还林近 20 a 取得的显著成果,对生境的破坏也是不可想象的。本文将生境质量指数划分为 0~0.3,0.3~0.6,0.6~0.9,0.9~1.0,分别表示生境质量低、较低、较高和高 4 个等级,统计了各个等级土地利用面积的百分比(表 6)。总体上汾河源头区域生境质量处于较高水平。相比 2017 年,情景 2 中生境质量较高等级和高等级的面积有一定程度的增加,说明生态保护对于生境质量的提升具有重要的意义。

不同土地利用类型能够提供的生境质量服务具有差异。为了探讨土地利用类型对生境质量的贡献,本文利用 ArcGIS 软件中分区统计工具测算了每种土地利用类型的生境质量指数。6 种土地利用类型对生境质量的贡献由高到低依次为林地、水域、草地、

耕地、未利用地、建设用地。以 2017 年为基础对比 2030 年的 3 种发展情景,在情 1 中,林地、草地、水域的生境质量分别增加了 0.007,0.016,0.112,耕地、建设用地、未利用地分别减少了 0.034,0.087,0.087。情景 2 中,林地、草地、水域分别增加了 0.004,0.014,0.026,耕地、建设用地、未利用地分别减少了 0.020,0.083,0.034。情景 3 中,林地、草地、水域的生境质量分别增加了 0.005,0.011,0.073,耕地、建设用地、未利用地的生境质量分别减少了 0.027,0.079,0.045。这是由于退耕还林的持续实施带来的巨大生态效益,生境质量水平在一定程度上得以提高,林地、草地及水域对生境质量的影响力较大。另外,在经济快速发展和人口的压力下,建设用地的持续增加以及对耕地造成的不利影响,给生境质量带来了较大的负面作用。

表 6 不同生境质量分级的土地利用面积占比 %

生境质量 分级	2017 年	2030 年 情景 1	2030 年 情景 2	2030 年 情景 3
0~0.3	3.05	4.32	3.01	3.31
0.3~0.6	24.65	24.64	20.73	31.90
0.6~0.9	42.19	41.56	42.49	37.52
0.9~1.0	30.10	29.48	33.76	27.27

3.3.3 不同海拔和坡度的生境质量分析 为了探讨地形对生境质量的影响,采取等间距法将海拔分为 1 000~1 400 m,1 400~1 800 m,1 800~2 200 m、>2 200 m,将坡度分为 0°~6°,6°~15°,15°~25°、>25°,分别统计了不同时期生境质量随海拔、坡度的变化。结果均表明随着海拔和坡度的升高,汾河源头区域的生境质量也不断得到提高。因此测算了生境质量在不同海拔和坡度的变化量,见图 4。从同一时期不同海拔的生境质量分析,在 2000—2017 年表现为 1 000~1 800 m 为增加趋势,>1 800 m 生境质量减少。2017—自然发展情景中,除 1 400~1 800 m 生境质量减少量较多外,其他无显著变化。2017—生态保护情景中,在海拔各个分级中都明显的增加,相反在 2017—耕地保护情景中,均有不同程度的降低。同一海拔下不同情景生境质量的变化具有差异,可以看出海拔较低的区域生境质量变化较明显。从不同坡度等级来分析不同情景下的生境质量的变化,0°~6°生境质量都表现为降低,表明容易受人为干扰的区域,生境质量最可能有下降趋势。6°~15°和 15°~25°两个坡度分级中,生境质量变化方向具有一致性,2000—2017 年和 2017—生态保护情景均表现为增加,其他均为降低态势。>25°中未来 2030 年 3 种情景生境质量均为增加态势。

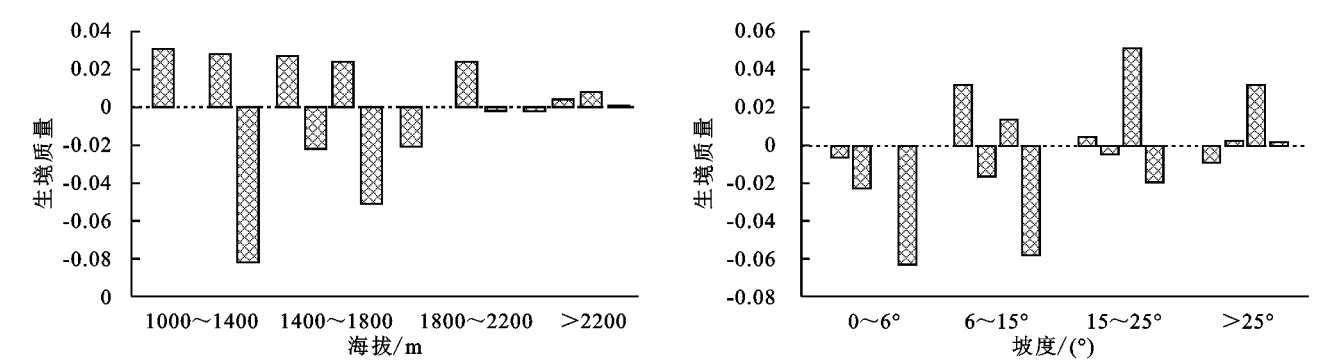


图4 不同情景下生境质量随海拔和坡度的变化

## 4 结论与讨论

(1) 汾河源头区域主要土地利用类型为耕地、林地和草地,占总面积的90%以上。2000—2010年为该区域退耕还林的第一个阶段,耕地面积减少了10.91%,草地减少了9.39%,林地增加了41.84%。2010—2017年,随着退耕还林工程第2个阶段的实施,耕地面积继续减少,林地面积不断得到补充。2017—2030年自然发展情景下建设用地扩张较为明显,林地仅增加了9.56%,耕地、草地和未利用地都有不同程度的减少;生态保护情景下,林地面积增加了12.98%,耕地得到大幅度地减少;耕地保护型情景下,耕地面积增加了29.14%,林地、草地以及水域等呈减少趋势。

(2) 2017—2030年自然发展情景,植被正向演替占总面积的6.17%,植被逆向演替占6.94%,人工地表正向及逆向演替分别占0.01%,1.13%;对于生态保护情景,研究区均为植被正向演替,占总面积的6.19%;耕地保护情景下,则大多区域会发生植被逆向演替,占总面积的11.59%,植被正向演替占2.36%,向人工地表逆向演替占0.35%。

(3) 2017年的生境质量指数为0.78,2030年自然发展情景、生态保护情景、耕地保护情景生境质量分别为0.76,0.81,0.72。6种土地利用类型对生境质量的贡献由高到低依次为林地、水域、草地、耕地、未利用地、建设用地。不同情景下的生境质量结果均表明随着海拔和坡度的升高,汾河源头区域的生境质量也不断得到提高,但是同一海拔和坡度下不同情景生境质量的变化具有差异。

本文运用Logistic-CA-Markov模型实现了土地利用变化模拟在数量和空间上的优势,并对驱动因子和土地利用模拟结果进行了精度验证,但是仍然不足之处,在模拟2030土地利用情景中仅仅调试Markov模型的转移概率以及转变适宜性图集来估算3种土地利用面积及空间分布,虽然考虑了地方规划的需求,但仍然与区域政策结合的不够深入。此外,驱动因子的选取也对模型的精度具有重要的影

响,本文虽然考虑到指标的空间均衡性以及数据的可获取性,从自然条件和社会经济等角度选取了驱动因子,但是仍然不够全面。在未来的研究中,应该着重考虑当地政策制定更为合理的土地利用需求,提高模型模拟预测的精度。

### 参考文献:

- [1] Van Horne B. Density as a misleading indicator of habitat quality[J]. the Journal of Wildlife Management, 1983,47(4):893-901.
- [2] 谢余初,巩杰,张素欣,等.基于遥感和InVEST模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究[J].地理科学,2018,38(6):979-986.
- [3] Johnson M D. Measuring habitat quality: A review[J]. Condor, 2007,109(3):489-504.
- [4] Grafius D R, Corstanje R, Warren P H, et al. The impact of land use/land cover scale on modelling urban ecosystem services[J]. Landscape Ecology, 2016, 31(7):1509-1522.
- [5] 刘春芳,王川,刘立程.三大自然区过渡带生境质量时空差异及形成机制:以榆中县为例[J].地理研究,2018,37(2):419-432.
- [6] 冯舒,孙然好,陈利顶.基于土地利用格局变化的北京市生境质量时空演变研究[J].生态学报,2018,38(12):4167-4179.
- [7] Falcucci A, Maiorano L, Boitani L. Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation[J]. Landscape Ecology, 2007,22(4):617-631.
- [8] 刘世梁,尹艺洁,杨珏婕,等.漫湾库区景观破碎化对区域生境质量的影响[J].生态学报,2017,37(2):619-627.
- [9] 吴健生,毛家颖,林倩,等.基于生境质量的城市增长边界研究:以长三角地区为例[J].地理科学,2017,37(1):28-36.
- [10] 郑宇,张蓬涛,汤峰,等.基于InVEST模型的昌黎县土地利用变化对生境质量的影响研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(7):121-128.
- [11] Crooks K R, Burdett C L, Theobald D M, et al. Quantification of habitat fragmentation reveals extinction risk in ter-



- restrial mammals[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(29): 7635-7640.
- [12] 王琼, 范志平, 李法云, 等. 蒲河流域河流生境质量综合评价及其与水质响应关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 516-523.
- [13] 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 等. 基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 105-114.
- [14] 雷呈, 黄琪, 倪才英, 等. 袁河流域河流生境质量评价及其影响因素分析[J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2019, 43(4): 425-432.
- [15] 彭建, 徐飞雄. 不同格网尺度下的黄山市生境质量差异分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(6): 887-897.
- [16] 顾羊羊, 黄贤峰, 邹长新, 等. 沅江源自然保护区生境质量变化遥感监测[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 764-772.
- [17] 包玉斌, 刘康, 李婷, 等. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响: 以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 622-629.
- [18] 税燕萍, 卢慧婷, 王慧芳, 等. 基于土地覆盖和 NDVI 变化的拉萨河流域生境质量评估[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8946-8954.
- [19] 巩杰, 马学成, 张玲玲, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 191-196.
- [20] 荣月静, 张慧, 王岩松. 基于 Logistic-CA-Markov 与 InVEST 模型对南京市土地利用与生物多样性功能模拟评价[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 82-89.
- [21] 包玉斌, 刘康, 李婷, 等. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响: 以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 622-629.
- [22] 李俊, 董锁成, 李宇, 等. 宁蒙沿黄地带城镇用地扩展驱动力分析与情景模拟[J]. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1472-1485.
- [23] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 等. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4106-4118.
- [24] 顾羊羊, 黄贤峰, 邹长新, 等. 沅江源自然保护区生境质量变化遥感监测[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 764-772.

(上接第 249 页)

- [11] 王士远, 张学霞, 朱彤, 等. 长白山自然保护区生态环境质量的遥感评价[J]. 地理科学进展, 2016, 35(10): 1269-1278.
- [12] 杨江燕, 吴田, 潘肖燕, 等. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 277-284.
- [13] 郭佳佳. 奈曼旗兴隆沼林场土地沙漠化评价研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2018.
- [14] 杨济. 内蒙古奈曼旗教来河河谷谷坡风水复合侵蚀机理研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2011.
- [15] 董佳蕊, 张桂英, 刘媛媛. 2017 年奈曼旗干旱灾害分析[J]. 现代农业科学, 2018(9): 241, 244.
- [16] Goward S N, Xue Y K, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements An exploration with the simplified simple biosphere model[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2/3): 225-242.
- [17] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17(3): 301-306.
- [18] Huang C, Wylie B, Yang L, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(8): 1741-1748.
- [19] Baig M H A, Zhang L, Shuai T, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5): 423-431.
- [20] Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping[J]. Tropical Ecology, 2002, 43(1): 39-47.
- [21] Xu H Q. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14): 4269-4276.
- [22] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2004, 3(61): 28-36.
- [23] 乐通潮, 聂森, 潘辉, 等. 基于 Landsat8 卫星影像的地表温度反演及福州春季城市热岛效应分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 154-160.
- [24] 张继平, 常学礼, 李健英, 等. 内蒙古奈曼旗农牧交错区土地利用/覆被变化的区域分异[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 613-620.
- [25] 蒋超亮, 吴玲, 刘丹, 等. 干旱荒漠区生态环境质量遥感动态监测: 以古尔班通古特沙漠为例[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 877-883.
- [26] 张文强, 孙从建, 李新功. 晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估[J]. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1748-1758.