中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

基于InVEST模型的未利用地开发前后生境质量评价——以唐县为例

陈雅倩，赵丽，陶金源，张蓬涛

引用本文:
陈雅倩, 赵丽, 陶金源, 等. 基于InVEST模型的未利用地开发前后生境质量评价——以唐县为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 1093–1102.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190862

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

延安市退耕还林(草)工程对生境质量时空格局的影响

Impact of the ‘Grain for Green’ project on the spatial and temporal pattern of habitat quality in Yan’an City, China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 575–586 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190762

天山北坡经济带宜耕未利用地开发潜力分区及评价——以新疆阜康市为例

Evaluation of potential of unused land exploitation in Northern Tianshan Mountain Economic Belt— A case study of Fukang City

中国生态农业学报. 2016, 24(6): 819–828 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151169

基于景观连通性的怀来县未利用地开发建设适宜性评价

Suitability evaluation of unused land as construction land in Huailai based on landscape connectivity theory

中国生态农业学报. 2016, 24(7): 969–977 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151260

黄骅市未利用地开发适宜性分区研究

Regionalization of suitable development of unutilized lands in Huanghua City

中国生态农业学报. 2018, 26(4): 604–615 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170583

沽源县未利用地生态重要性空间识别及其地形梯度特征分析

Spatial recognition of ecological importance and analysis of terrain gradients characteristic of unused lands in Guyuan County

中国生态农业学报. 2016(2): 256–264 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150868

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 7 月 第 28 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2020, 28(7): 1093−1102

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190862

陈雅倩, 赵丽, 陶金源, 张蓬涛. 基于 InVEST 模型的未利用地开发前后生境质量评价——以唐县为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 1093−1102
CHEN Y Q, ZHAO L, TAO J Y, ZHANG P T. Habitat quality evaluation before and after unused land development based on InVEST model: A case study of Tang County[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(7): 1093−1102

基于 InVEST 模型的未利用地开发前后生境质量评价*

——以唐县为例

陈雅倩, 赵 丽**, 陶金源, 张蓬涛

(河北农业大学国土资源学院 保定 071000)

摘 要: 生境质量评价对生物多样性保护有至关重要的作用, 为探究未利用地开发对唐县生境质量的影响, 本文运用 InVEST 模型中的 Habitat Quality 模块分析 2000 年、2007 年和 2016 年河北省唐县未利用地开发前后的生境质量变化情况。研究表明: 1)2000—2016 年, 未利用地开发方向主要以草地、林地和耕地为主, 未利用地比例从 100%(以 2000 年未利用地面积为基数)减少到 33.70%, 草地、林地和耕地比例从 0 分别增加到 27.43%、21.30%和 10.46%。2)唐县未利用地斑块所占景观面积比逐年减少, 其平均斑块面积由开发前的 94.73 hm^2 减少到开发后的 6.15 hm^2; 林地、水域和草地所占景观面积比例增加。未利用地开发后均匀度指数和多样性指数都有所增加, 各景观组分所占面积比例差异减小, 生态系统稳定性提高。3)未利用地开发后, 研究区生境质量明显提升, 生境质量得分由 2000 年的 0.09 上升到 2007 年的 0.28, 2016 年又上升到 0.39。研究结果可以为制定合理的土地规划以及土地开发工作中的生境及生物多样性保护等提供科学依据。

关键词: InVEST 模型; 唐县; 未利用地; 景观指数; 生境质量

中图分类号: X171.1 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Habitat quality evaluation before and after unused land development based on InVEST model: A case study of Tang County*

CHEN Yaqian, ZHAO Li**, TAO Jinyuan, ZHANG Pengtao

(College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: At present, habitat quality is under constant threat due to the impact of human activities. Therefore, it is particularly important to assess habitat quality status and trends. In this study, the Habitat Quality module of InVEST model was used to analyze the impact of unused land development on habitat quality in Tang County, China in 2000, 2007, and 2016. The results showed that 1) from 2000 to 2016, the development direction for unused land was mainly grassland, forest land, and cultivated land. The proportion of unused land decreased from 100% (based on the unused land area in 2000) to 33.70%, whereas the proportion of grassland, forest land, and cultivated land increased from 0% to 27.43%, 21.30%, and 10.46%, respectively. 2) The proportion of unused land patches in the landscape area of Tang County decreased year by year. The average patch area decreased from 94.73 hm^2 before development to 6.15 hm^2 after development, and the forest land, water area, and grassland proportions in the landscape area increased.

* 河北省社会科学基金项目(HB18GL053)资助
** 通信作者: 赵丽, 主要研究方向为土地利用与评价、土地生态。E-mail: zhaoli1302@126.com
陈雅倩, 主要研究方向为土地资源规划与利用。E-mail: chenyaqiann@163.com
收稿日期: 2019-12-09 接受日期: 2020-03-31
* This study was supported by the Social Science Fund Project (HB18GL053).
** Corresponding author, E-mail: zhaoli1302@126.com
Received Dec. 9, 2019; accepted Mar. 31, 2020

Furthermore, the evenness and diversity indexes increased after the unused land was developed and ecosystem stability improved. 3) After the exploitation of unused land, the habitat quality in the study area significantly improved, and the habitat quality score increased from 0.09 in 2000 to 0.28 in 2007, and then to 0.39 in 2016. The habitat quality high value areas were mainly located in the middle of the study area and northwest of Qijiazuo Town, the southern part of Huangshikou Town and the northern part of Yangjiao Town. However, the habitat quality in Chuanli Town, Juncheng Town, and Luozhuang Town, and in the southern region was lower. This study analyzed the impact of unused land development on habitat quality, and the results provide a scientific basis for making reasonable land planning decisions and for protecting habitat and biodiversity during land development.

Keywords: InVEST model; Tang County; Unused land; Landscape index; Habitat quality

生境质量指环境(自然环境)为个体和种群的持续生存与发展提供适宜条件的能力，生境质量的优劣决定人类与自然及其他种群的可持续发展与和谐发展[1]。目前，生境质量由于人类活动的影响而不断受到威胁，因此，评估生境质量现状及变化趋势对研究生物多样性及其保护工作尤其重要。王玉等[2]采用 SolVES 模型对湿地森林公园的生态系统服务价值进行研究，从而评估出不同服务的社会价值重要性为美学>历史>生物多样性>娱乐>文化>康体健身；孟庆林等[3]运用 HSI 模型，对吉林省东部地区生境质量进行评价，并分析了变化原因，得出土地覆被变化是导致生境质量变化的主要原因；刘园等[4]基于 InVEST 模型，研究长江中下游经济带生境质量时空分异特征及地形梯度效应，得出 1995—2015 年平均生境质量下降，且随地形梯度的上升，高等级生境质量面积增加。运用数字模型评价虽然存在一些局限性，如 SolVES 模型中的问卷调查涉及不同受访者的理解程度[3]; HSI 模型通常需要假设物种与环境之间存在线性关系[5]; InVEST 模型在评估生境质量时，根据研究区域的不同，要设置不同的参数。但相对于通过野外数据测量的方法来说，运用模型评价优势明显，其操作简单快捷，不需要进行野外实地测量来获取数据，因此被广泛运用。目前最为常用的是 InVEST 模型(Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs)，它由美国斯坦福大学、大自然保护协会和世界自然基金会联合开发，InVEST 模型对数据量的需求较低，并且其计算结果空间可视化较强、评估精度较高，能够反映出不同景观格局下的生境分布情况[6]。因此本文参考相关文献资料并对研究区进行充分调研基础上，设置合理参数，选用 InVEST 模型对生境质量进行评价。

随着我国经济的快速发展，建设用地与耕地占补平衡的矛盾日益加剧，未利用地作为重要的土地后备资源，对其进行开发已经成为解决土地需求的一种重要途径。然而，土地开发改变土地利用方式，因此对生境斑块之间的物质流、能量流的循环过程产生影响，继而对生境质量和分布格局产生影响[7-8]。在未利用地开发过程中，人们的首要目的是增加可用土地面积，近期利益的吸引导致许多不合理的开发，从而引发许多生态问题，使得生境退化、生境质量下降。因此，探讨未利用地开发对生境质量的影响，对生物多样性保护及生态系统平衡具有重要意义。近年来，国内外学者针对未利用地开发适宜性评价、开发潜力、分区等进行了大量研究。如 Fitzsimons 等[9]、Afshari 等[10]、韦仕川等[11]对未利用地开发适宜性进行评价，分别得出各研究区域的开发模式，为土地优化和整治提供依据；曾庆敏等[12]通过构建指标体系，对新疆阜康市未利用地进行评价，得出 5 级未利用地适宜开发潜力区的空间分布情况，从而为阜康市未利用地的开发利用提供参考；朱成立等[13]以江苏省未利用地中的其他草地和沿海滩涂为研究对象，分析开发限制因素，从不同的方向研究了土壤改良措施，从而对江苏省 2 种主要宜农未利用地开垦提出了工程、农艺和生化措施来改良土壤；彭建等[14]、潘翔等[15]对低丘缓坡等未利用地建设开发生态风险进行评价，按照开发适宜性和风险程度，划分出了不同的开发级别。总体来看，现有文献多是对未利用地开发前的研究，几乎没有针对未利用地开发前后的生境质量变化研究。本文以河北省唐县为例，运用 InVEST 模型，分析未利用地开发前后生境质量的时空演变，以期为未利用地开发工作中生物多样性的保护以及土地规划的制定提供科学依据，从而更好地实现土地的永续发展。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

唐县隶属于河北省保定市，地处河北省中部，38°37′~39°09′N，114°27′~115°03′E，海拔在 41~1 840 m，东与顺平县、望都县相邻，南靠定州市，西与曲阳县、阜平县相接，北与涞源县毗邻。唐县土地总面积为 1 414.21 km^2，地势西北高、东南低，属于典型的低山丘陵区，山地面积为 1 159.65 km^2，占唐县总面积的 82%。唐县属暖温带大陆性季风气候，四季分明，气候宜人，年平均降水量和年均蒸发量分别

为 575 mm、1 521 mm。境内水系包括清水河、唐河等。截至 2016 年底, 唐县下辖 7 个镇、13 个乡、345 个行政村, 总人口 60.26 万(图 1)。

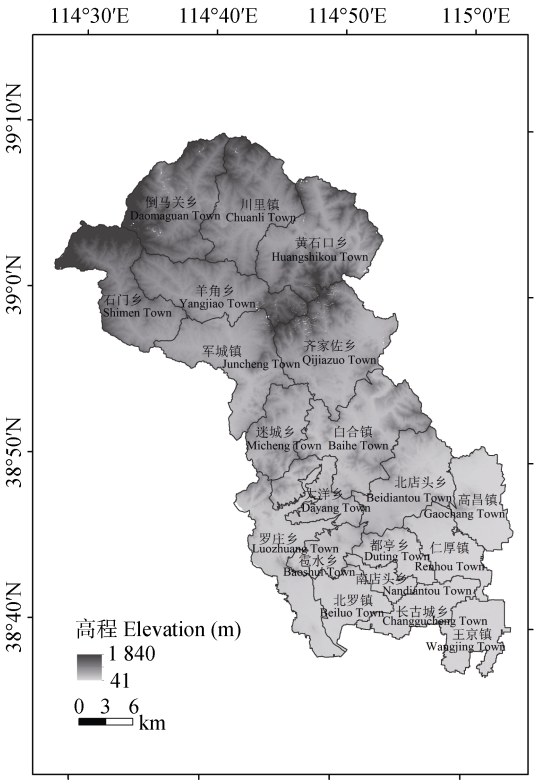

图 1　唐县地理位置及高程图

Fig. 1　Position and elevation map of Tang County

唐县 2000 年未利用地面积为 81 900.39 hm², 占全县面积的 63.81%, 是占比最大的土地利用类型。其中, 未利用地包括荒草地、裸岩石砾地、田坎、沙地、沼泽地及其他未利用地, 荒草地面积为 60 453.45 hm², 占全县未利用地面积的 73.81%, 在全县大量分布, 裸岩石砾地、田坎、沙地、沼泽地及其他未利用地分别占 21.49%、4.42%、0.12%、0.02%和 0.14%。

1.2　数据来源

本研究 3 期(2000 年、2007 年、2016 年)土地利用数据来源于地理空间数据云(http://www. gscloud. cn/)中空间分辨率为 30 m 的 Landsat 系列数据产品, 影像轨道编号为 124/33。对不同用地类型进行监督分类, 获取唐县未利用地开发前后的 3 期土地利用图, 具体划分为耕地、林地、草地、城镇和农村居民点用地、交通用地、水域和未利用地 7 种地类, 分类的精度采用 Kappa 系数检测, 各期该系数值均在 0.80 以上, 满足分类精度要求。本文以栅格作为基本单位进行生境质量的评价。

2　研究方法

2.1　土地利用变化分析

基于 ArcGIS 10.2 软件平台提取唐县 2000 年未利用地矢量数据, 并用其对 2007 年和 2016 年的现状图进行裁剪, 从而得到研究区未利用地开发前后土地利用现状图。将唐县未利用地开发前(2000 年)、开发后(2007 年和 2016 年)分辨率为 30 m 的 3 期土地利用数据分别进行叠加, 从而获得开发前后的土地利用转移矩阵, 对未利用地开发后的土地利用类型构成与来源进行分析。

通常, 景观中的斑块大小、连通性及景观多样性等对生物多样性及各种生态过程都有重要影响, 基于 Fragstats 3.3 软件, 根据相关学者的研究[16-18], 选择常用的景观格局指数进行分析。类型水平和景观水平的指数[19-21]分别包括: 斑块面积所占景观百分比(MPS)、最大斑块指数(LPI)、平均斑块面积(AREA_MN)和斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、均匀度指数(SHEI)、多样性指数(SHDI), 各指数含义见表 1。这些指数能在一定程度上反映景观格局的数量、面积等空间构型特征以及景观的异质性、优势性和破碎化程度, 从而进一步研究唐县未利用地开发前后的景观格局情况, 更加深入探讨土地利用景观格局变化与生境质量变化之间的关系。

2.2　基于 InVEST 3.7.0 模型的生境质量评价方法

InVEST 模型是从生物多样性的角度对生境质量进行量化评估[22-23]。其模型中生境质量可以通过评估某一地区各种生境类型或植被类型的范围和这些类型各自的退化程度来表达。模型使用威胁数据图层来评估不同土地利用类型的退化程度, 其中, 威胁数据图层包括: ①每种威胁的相对影响; ②生境栅格与威胁之间的距离、威胁所带来的影响; ③栅格单元受到的法律保护程度; ④每种生境类型对每种威胁的相对敏感性。基于以上 4 个威胁数据图层, 计算出生境类型 j 中栅格 x 的总威胁水平 D_{xj}, 采用半饱和函数将一个栅格单元退化分值解译成生境质量得分值, 即 Q_{xj}。具体计算公式如下:

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

式中: j 为生境类型, x 为不同的栅格, Q_{xj} 为 j 生境栅格 x 的生境质量, H_j 为生境适宜性, D_{xj}^z 为 j 生境栅格 x 的总威胁水平, k 为半饱和参数。D_{xj} 的计算公式如式(2), z 值一般默认取 2.5[24]。生境质量得分最高为 1, 最低为 0。

表 1 景观指数及其生态学含义

Table 1 Landscape indexes and their ecological meaning

景观指数 Landscape index	生态学含义 Ecological meaning
斑块数量 Number of patches	景观中斑块总数，值越大表明景观异质性越高，同时景观破碎度也越高。The total number of patches in the landscape; the larger the value, the higher the heterogeneity of landscape and the higher the degree of landscape fragmentation.
斑块密度 Patch density	单位面积上某种类型斑块的个数，反映斑块的密集程度。The number of patches of some type per unit area, it reflects the density of plaques.
平均斑块面积 Mean patch area	景观总面积与斑块数量的比值，值越大景观破碎度越低。The ratio of the total landscape area to the number of patches; the larger the value, the lower the degree of landscape fragmentation.
最大斑块指数 Largest patch index	某一斑块类型中的最大斑块占据整个景观面积的比例，其值的大小决定着景观中的优势种、内部种的丰度等生态特征，反映人类活动的方向和强弱。The proportion of the largest patch of a certain patch type of the whole landscape area, and its value determines the dominant species in the landscape, the abundance of internal species and other ecological characteristics, and reflects the direction and strength of human activities.
斑块所占景观面积比 Area percent of patch to landscape	某一斑块类型的总面积占整个景观面积的百分比，反映景观中模地或优势景观元素。The percentage of the total area of a certain patch type in the whole landscape area, it reflects the mold land or dominant landscape elements in the landscape.
均匀度指数 Shannon's evenness index	反映景观组成的均匀度和优势度，其值越大，表明斑块类型越多或各景观组分所占比例越接近。Reflecting the uniformity and dominance of landscape composition, the greater the value, the more types of patches or the closer the proportion of each landscape component.
多样性指数 Shannon's diversity index	表示土地利用斑块类型的丰富程度，反映土地生态系统结构的合理程度。It represents the richness of land use patch type and reflects the reasonable degree of land ecosystem structure.

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Y_r}\left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^{R}\omega_r}\right)r_y i_{rxy}\beta_x S_{jr} \qquad (2)$$

式中：r 为威胁源，R 为威胁源总个数，y 为威胁源 r 栅格中的所有栅格数，Y_r 为威胁源 r 栅格图上的一组栅格，ω_r 为威胁源的权重，r_y 为栅格 y 的威胁因子值，i_{rxy} 为栅格 y 的威胁源 r_y 对生境栅格 x 的威胁水平，β_x 为栅格 x 的可达性水平(即法律保护程度)，S_{jr} 为生境类型 j 对威胁源 r 的敏感程度。其中，i_{rxy} 的计算公式为：

$$i_{rxy}=1-\left(\frac{d_{xy}}{d_{\max}}\right) \qquad (3)$$

式中：$d_{\max}$ 为威胁源 r 的最大影响距离，d_{xy} 为栅格 x 到栅格 y 之间的直线距离。

本研究参照吴建生等[25]、杨志鹏等[26]、巩杰等[27]的研究，考虑到建设用地是所有土地利用类型中人类活动较为集中的地类，而生境质量演变又主要受到人类活动的胁迫，人类改造地表的活动及建设用地的扩张会造成生态的污染及破坏，从而对生物多样性及生境质量带来较大的威胁，因此选取的威胁源为交通用地、城镇和农村居民点的矢量数据，并以该模型推荐的数值[24]及研究区实际情况作为依据，对这两类威胁源的影响权重和最大影响距离进行赋值(表 2)。结合相关文献[17, 28-29]，从而确定模型运行所需要的各土地利用类型的生境质量得分和其对威胁源的敏感性程度(表 3)。

3 结果与分析

3.1 唐县未利用地开发前后土地利用变化

未利用地开发前后(2000—2016 年)，研究区土地覆被发生了较为明显的变化，草地、林地和耕地是唐县未利用地开发后主要的土地类型。2000 年未利用地面积为 81 900.39 hm^2。相较于 2000 年，2007 年未利用地面积大量减少，主要是转为草地、林地和耕地，转化比率分别为 17.72%、14.01%和 11.34%。2007—2016 年间，草地、林地和水域面积不断增多，而未利用地面积呈现持续减少状态；具体来讲，未利用地有 46.54%(19 805.30 hm^2)保持稳定，28.22%(12 009.15 hm^2)转为草地，13.96%(5 940.74 hm^2)转为林地，7.08%(3 012.93 hm^2)转为耕地，0.17%(72.34 hm^2)转为水域；草地的转入来源主

表 2 威胁源的最大影响距离、权重和空间衰退类型

Table 2 Maximum distance of influence, weight and type of decay over space of threat factors

威胁因子 Threat factor	最大影响距离 Max distance of influence (km)	权重 Weight	空间衰退类型 Type of decay over space
城镇和农村居民点用地 Urban and rural settlements	1.0	1.0	线性 Linear
交通用地 Transportation land	0.5	0.6	线性 Linear

表 3　不同土地利用类型生境适宜度及其对各威胁源的敏感度
Table 3　Habitat suitability and sensitivity to various threat sources of different land use types

土地利用类型 Land use type	生境质量得分 Habitat quality score	威胁因子 Threat factor	
		城镇和农村居民点用地 Urban and rural settlements	交通用地 Transportation land
耕地 Cultivated land	0.4	0.3	0
林地 Forest land	1.0	0.9	0
草地 Grassland	0.6	0.3	0.2
城镇和农村居民点用地 Urban and rural settlements	0	0	0.8
交通用地 Transportation land	0	0	0.8
水域 Water area	0.9	0.9	0.2
未利用地 Unused land	0.1	0.1	0.6

要是未利用地和耕地，水域的转入来源主要是交通用地、城镇和农村居民点用地，研究区域的土地利用转移矩阵如表 4 所示。总体来讲，2000—2016 年，唐县未利用地开发后土地利用变化特点是未利用地逐渐减少，草地、林地和耕地等土地利用类型增加。

2000—2016 年期间未利用地变化较大的原因，一方面，经济发展与耕地保护的矛盾加快对未利用地的开发；另一方面，随着国家对生态环境保护的重视程度逐渐增加，未利用地主要开发为林地和草地。随着 2008 年国家“大规模实施土地整治”政策的提出，唐县白合镇、齐家佐乡、黄石口乡等乡镇实施了一系列土地开发整理项目，重点关注补充耕地数量、质量与生态三者的统一。受地形、土壤等自然条件影响，唐县未利用地开发的类型差异明显，南部主要为平原，地形较为平坦，未利用地主要开发为耕地、城镇与农村居民点用地，北部、中部为山地丘陵区，未利用地主要开发为林地和草地。

表 4　唐县未利用地开发前(2000 年)、开发后(2007 年和 2016 年)土地利用转移矩阵
Table 4　Transfer matrix of land use before (2000) and after (2007 and 2016) exploitation of unused land in Tang County　%

年份 Year	类型 Type	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	城镇和农村居民点用地 Urban and rural settlements	交通用地 Transportation land	水域 Water area	未利用地 Unused land
2000—2007	未利用地 Unused land	11.34	14.01	17.72	3.83	0.69	0.45	51.96
2007—2016	耕地 Cultivated land	40.08	7.09	24.49	7.32	1.77	0.95	18.30
	林地 Forest land	0.83	73.18	8.96	0.19	0.05	0.03	16.76
	草地 Grassland	10.32	16.51	43.81	3.50	0.81	0.20	24.85
	城镇和农村居民点 Urban and rural settlements	7.04	1.66	20.20	52.93	5.83	1.31	11.03
	交通用地 Transportation land	2.90	0.11	15.40	27.83	8.74	10.41	34.61
	水域 Water area	3.70	0.92	18.34	6.33	6.58	59.87	4.26
	未利用地 Unused land	7.08	13.96	28.22	3.41	0.62	0.17	46.54
2000—2016	未利用地 Unused land	10.46	21.30	27.43	5.49	0.99	0.63	33.70

3.2　唐县未利用地开发前后土地利用景观格局变化

从景观格局的视角对未利用地开发前后的变化做进一步的探讨。从类型水平景观格局分析(表 5)，未利用地开发前(2000 年)，研究区最大斑块指数和平均斑块面积都较大，分别为 95.94%和 94.73 hm^2。开发后(2007 年、2016 年)，未利用地的最大斑块指数、斑块所占景观面积比以及平均斑块面积都明显减小，表明对未利用地的开发较大，随着经济建设的发展，对土地的需求加大。林地最大斑块指数和斑块所占景观面积比增加，最大斑块指数由 4.25%增加到 4.97%，斑块所占景观面积比由 14.00%增加到 21.27%；草地的斑块所占景观面积比由 17.72%增加到 27.45%，说明研究区的优势景观发生改变。与 2007 年相比，2016 年未利用地的斑块所占景观面积比显著减小 35.15%，林地和草地的斑块所占景观面积比增加值较多，分别增加 51.93%和 54.91%，说明 2007—2016 年优势景观面积(林地、草地)持续增加，这主要是因为政府对生态环境保护的日益重视。林地、城镇和农村居民点、交通用地和未利用地这几种地类的平均斑块面积减小，表

表 5 唐县未利用地开发前(2000 年)、开发后(2007 年和 2016 年)类型水平景观指数变化

Table 5 Landscape indexes changes at type level before (2000) and after (2007 and 2016) exploitation of unused land in Tang County

地类 Type	最大斑块指数 Largest patch index (%)			斑块所占景观面积比 Area percent of patch to landscape (%)			平均斑块面积 Mean patch area (hm^2)		
	2000	2007	2016	2000	2007	2016	2000	2007	2016
耕地 Cultivated land		0.66	1.76		11.34	10.46		3.51	3.76
林地 Forest land		4.25	4.97		14.00	21.27		6.31	3.48
草地 Grassland		4.65	3.84		17.72	27.45		3.82	3.89
城镇和农村居民点 Urban and rural settlements		0.59	0.29		3.83	5.50		1.77	1.72
交通用地 Transportation land		0.11	0.03		0.69	0.99		1.65	0.63
水域 Water area		0.12	0.14		0.47	0.64		1.03	1.29
未利用地 Unused land	95.94	20.24	4.51	100.00	51.95	33.69	94.73	11.87	6.15

明这几种景观存在一定的破碎化及分散式开发利用的情况；平均斑块面积增加的土地利用类型是耕地、草地和水域。总的来看，威胁源及生境适宜性较差的地类破碎化程度加大，而生境适宜性较好的地类呈现出聚集效应。

从景观水平景观格局角度进行分析(表 6)，未利用地在开发前，均匀度指数和多样性指数均为 0，未利用地开发后，均匀度指数和多样性指数增加，2007 年分别为 0.70 和 1.35，2016 年分别为 0.78 和 1.52，说明各景观组分所占面积比例差异减小，由开发前单一地类(未利用地)开发为多种地类，并且未利用地面积持续减少，均匀度指数的增加说明景观生态系统稳定性提高。未利用地开发后，虽然斑块数量和斑块密度增加，其主要原因是完整的未利用地被开发为林地、草地等多种地类，从而呈现出一定的破碎化趋势。

表 6 唐县未利用地开发前(2000 年)、开发后(2007 年和 2016 年)景观水平景观指数变化

Table 6 Landscape indexes changes at landscape level before (2000) and after (2007 and 2016) exploitation of unused land in Tang County

年份 Year	斑块数量 Patches number	斑块密度 Patch density	均匀度指数 Shannon's evenness index	多样性指数 Shannon's diversity index
2000	961	1.06	0	0
2007	15 881	17.50	0.70	1.35
2016	24 232	26.69	0.78	1.52

3.3 唐县未利用地开发前后生境质量时空演变

基于 InVEST 模型的生境质量模块得到唐县未利用地开发前(2000 年)、未利用地开发后(2007 年、2016 年)的生境质量空间分布。在 ArcGIS 10.2 平台上运用自然间断分级法对生境质量进行分类，划分为 5 个等级，分别是 0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8 和 0.8~1.0，分别对应低等、较低等、中等、较高等、高等生境质量，各等级生境比例及生境平均值见表 7。

从时间角度来看，唐县未利用地开发前后，研究区生境质量总体水平较低。由表 7 可知未利用地开发前后(2000 年、2007 年、2016 年)，生境质量得分分别为 0.09、0.28 和 0.39，整体生境质量呈上升的趋势，即未利用地开发后，生境质量较开发前有所上升。未利用地开发前(2000 年)，生境质量得分均在 0~0.2，处于低等级。未利用地开发后(2007 年、2016 年)，生境质量整体呈现上升趋势；2007 年和 2016 年生境质量得分处于 0~0.2 的土地面积比例明显减少，分别减少为 66.16%和 49.07%，生境质量在 0.2~0.4 和 0.6~0.8 的土地面积比例较少，2007 年分别为 9.62%和 0.38%，2016 年分别为 8.86%和 0.42%，生境质量得分在 0.4~0.6 和 0.8~1.0 的土地面积比例增

表 7 唐县未利用地开发前(2000 年)、开发后(2007 年和 2016 年)各等级生境比例及生境平均值

Table 7 Percentage of each habitat level and average value of habitat quality before (2000) and after (2007 and 2016) unused land exploitation in Tang County

生境质量得分 Habitat quality score	比例 Proportion (%)		
	2000	2007	2016
0~0.2	100.00	66.16	49.07
>0.2~0.4		9.62	8.86
>0.4~0.6		12.79	24.04
>0.6~0.8		0.38	0.42
>0.8~1.0		11.05	17.61
生境质量平均值 Average value of habitat quality	0.09	0.28	0.39

加，并且面积比例较大，2007 年分别增加为 12.79%和 11.05%，2016 年分别增加为 24.04%和 17.61%，说明唐县未利用地开发后生境质量上升。

从空间角度来看唐县中部和西北部的生境质量水平较高，黄石口乡南部、羊角乡北部和齐家佐乡生境质量较好，主要分值在 0.8 以上，川里镇、军城镇和罗庄乡生境质量较低，主要分值在 0.2 以下，还有一些生境质量得分较低值，零星分布于研究区，研究区域的其他地方生境处于一般水平。与未利用地开发前(2000 年)相比，2007 年和 2016 年的生境质量分值在 0~0.2 的低质量生境斑块呈减少趋势(图 2)。

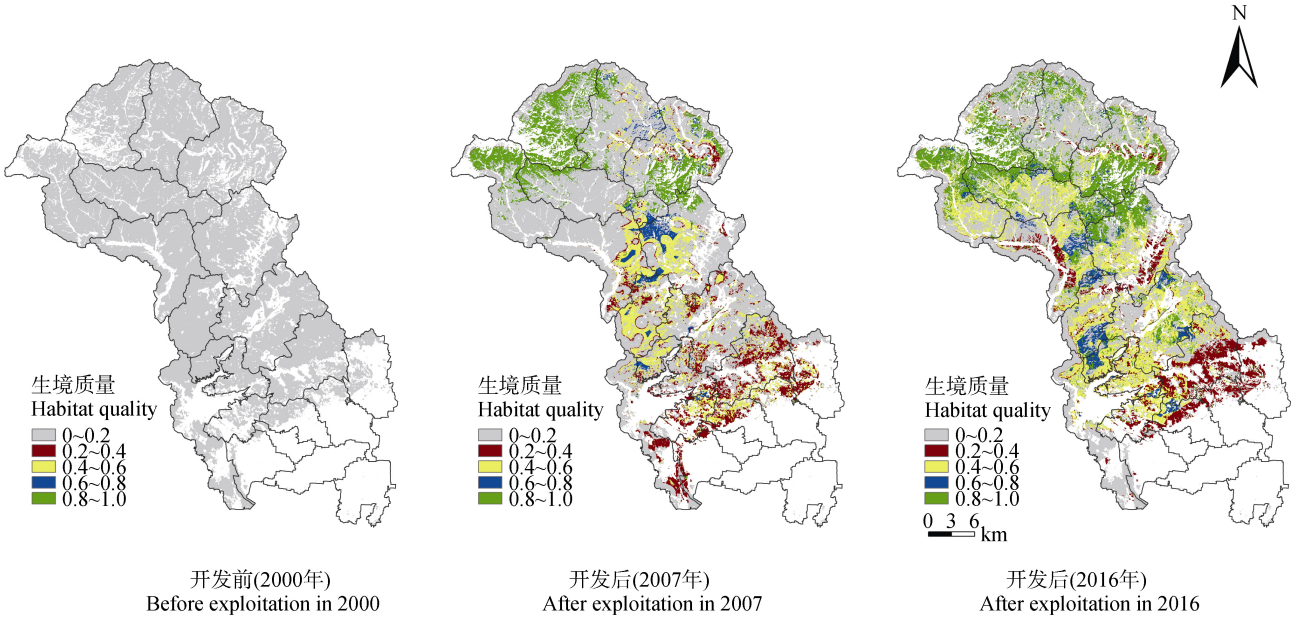

图 2　唐县未利用地开发前后生境质量空间分布图

Fig. 2　Spatial distribution of habitat quality before and after unused land exploitation in Tang County

3.4　唐县未利用地开发前后生境质量变化原因分析

上述变化可以表明，2000—2016 年，唐县未利用地开发后生境质量得到提升。从土地利用类型及其转移变化的角度来看，受国家推进未利用地开发政策及当前发展状况的影响，2000—2016 年土地利用变化的主要特点是未利用地大量减少，许多未利用地开发为林地、草地、耕地、水域、交通用地等土地类型，其中，在国家大力强调生态保护的背景下，林地、草地和耕地面积增加比较明显，唐县中部和北部为山地丘陵区，多开发为林地和草地，南部地势平坦，自然条件相对较好，多开发为耕地，作为生境威胁源的交通用地、城镇和农村居民点用地面积增加较少，这一土地利用变化的过程会对研究区生境质量产生重要影响，从而使得开发后研究区的生境质量发生好转。

从景观格局角度来看，未利用地斑块所占景观面积比逐年减少，平均斑块面积由开发前的 94.73 hm^2 减少到开发后的 6.15 hm^2，林地、水域和草地所占景观面积比例增多，优势景观发生改变。2007—2016 年，作为胁迫因子的交通用地的最大斑块指数由 0.11 减少为 0.03，城镇和农村居民点用地的最大斑块指数由 0.59 减少为 0.29，交通用地、城镇和农村居民点用地的面积虽然有所扩张，但是由于斑块数量的逐年增加，出现破碎化趋势，使得平均斑块面积也呈减少趋势，从而减弱了对生境的胁迫作用。未利用地开发后均匀度指数和多样性指数都呈增加趋势，表明景观类型逐渐呈现均衡化分布，生态系统稳定性提高。生境适宜性高的土地类型面积逐渐增加，生境适宜性差的未利用地面积急剧减少，从而形成开发后生境质量提升的现象。

生境质量高值区主要位于研究区中部和西北部的齐家佐乡、黄石口乡南部和羊角乡北部，齐家佐乡境内有著名的青虚山、西胜沟等自然景观，另外，黄石口乡是唐县的重点开发区域，根据宜农则农、宜林则林、综合开发的方向进行开发，政府对齐家佐乡和黄石口乡南部都进行过具体的开发项目分析，并因地制宜地实施土层加厚、水利设施建设等工程，填埋涵水功能好的壤土，实施过土地整治工程，从而改善区域生产条件、土壤质量、水土保持以及水源涵养的功能，植被覆盖率不断提高，生境质量处

于较高水平。川里镇、军城镇和罗庄乡及南部区域生境质量较低，这些乡镇有多条省道通过，处于交通网连接处，南部有京昆高速过境，受到的威胁程度较大，生境质量较低。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文运用 InVEST 模型研究了唐县未利用地开发前后(2000—2016 年)生境质量变化情况，并结合土地利用变化和景观格局进行分析，揭示了未利用地开发对生境质量的影响。研究结果显示未利用地开发后生境质量较开发前有所提升，生境质量提高的原因主要是具有重要生态服务功能的林地面积的增加和低生境适宜性土地面积的减少，这与刘春芳等[17]、王燕等[30]、谢怡凡等[31]研究中关于生境质量提升的原因一致。但在巩杰等[27]对甘肃白龙江流域生境质量的研究中显示，1997—2002 年，未利用地面积减少，但生境质量下降，这与本文研究结果不相符，其原因是建设用地增加的比例远大于未利用地减少的比例，而建设用地的快速扩张加剧了对研究区的胁迫作用，从而导致生境质量下降；本研究中未利用地面积减少，主要转化为林地和草地，故生境质量提高。分析未利用地开发前后的生境质量变化情况，可以为未来未利用地的开发提供参考，促进区域生境质量的提升。

2000 年的未利用地生境质量与 2007 年、2016 年的生境质量差距较大，其原因在于 2000 年的研究区域只有未利用地，未利用地本身的生境适宜性很低，另一方面是受到威胁源的胁迫作用，从而导致开发前生境质量较低，经开发后土地类型多样化，由于国家对生态环境保护的重视程度不断增加，发挥着重要生态服务功能的林地和草地面积明显增多，研究区优势景观发生改变，均匀度指数和多样性指数增加，生态系统稳定性提高，故 2007 年和 2016 年的生境质量显著提升。2007—2016 年，随着 2008 年国家“大规模实施土地整治”政策的提出，唐县实施了一系列土地开发整理项目，未利用地面积持续减少，林地、草地及耕地面积增加，建设用地面积虽也有增加，但是其平均斑块面积减小，从而减弱了威胁作用，研究区生境质量不断提升。本文未利用地开发后生境质量虽然有所提升，但总体上处于中等偏低水平，其主要原因可能是开发前未利用地斑块较大且完整，经过开发后，斑块变小并呈现出一定的破碎化趋势。在今后进行土地规划或制定相关政策时，应该考虑到各土地利用类型的合理配置，并且尽量避免零散式开发，从而减少土地的破碎化程度，使生境质量得到优化。

本文仅从未利用地开发对土地利用方式的改变和景观格局变化的角度探讨了未利用地开发对生境质量的影响，没有考虑未利用地开发后对研究区造成的长期影响，下一步研究可以通过野外实际调研等方法，综合考虑研究区地势、土壤条件等，分析未利用地开发对研究区生境质量的长期影响。另外，还可以结合 InVEST 模型中的其他模块(如碳储量等)，更加全面地评价未利用地开发所带来的影响。

4.2 结论

本研究通过分析唐县未利用地开发前后(2000—2016 年)土地利用类型的时空变化特征、景观格局变化以及生境质量变化情况，从而揭示了唐县未利用地开发对生境质量的影响，得到以下几个结论：

1)经过土地开发，大量的未利用地得到转化，2000—2016 年，未利用地面积从 100%(以 2000 年未利用地面积为基数)下降到 33.70%，开发方向主要是以林地、草地和耕地为主；耕地面积从 0 增加 10.46%，发挥着重要生态服务功能的草地和林地面积从 0 分别增加到 27.43%和 21.30%。

2)2000—2016 年，唐县未利用地斑块所占景观面积比逐年减少，平均斑块面积由开发前的 94.73 hm^2 减少到开发后的 6.15 hm^2，林地、水域和草地所占景观面积比例增多。未利用地开发前后均匀度指数和多样性指数都呈现增加趋势，各景观组分所占面积比例差异减小，生态系统稳定性提高。

3)唐县未利用地开发前后，3 期的生境质量得分分别为 0.09、0.28 和 0.39，生境质量呈现上升趋势。开发后的生境质量明显高于开发前的生境质量，其主要原因是生境适宜性较差的未利用地大量开发为其他生境适宜性较高的土地利用类型，比如林地、草地、耕地等，作为威胁源的交通用地和居民点用地面积虽然也有所增多，但增加比例相对较少，并且其平均斑块面积减小，减弱了对生境的胁迫作用，从而使研究区生境质量得到优化。

参考文献 References

[1] 彭建，徐飞雄，吴见，等. 典型旅游城市生境质量空间分异及其影响机理研究——以黄山市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2397–2409
PENG J, XU F X, WU J, et al. Spatial differentiation of habitat quality in typical tourist city and their influencing factors mechanisms: A case study of Huangshan City[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(10):

2397–2409

[2] 王玉, 傅碧天, 吕永鹏, 等. 基于 SolVES 模型的生态系统服务社会价值评估——以吴淞炮台湾湿地森林公园为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1767–1774
WANG Y, FU B T, LYU Y P, et al. Assessment of the social values of ecosystem services based on SoLVES model: A case study of Wusong Paotaiwan Wetland Forest Park, Shanghai, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(6): 1767–1774

[3] 孟庆林, 李明玉, 任春颖, 等. 基于 HSI 模型的吉林省东部地区生境质量动态评价[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 140–147
MENG Q L, LI M Y, REN C Y, et al. Dynamic assessment of habitat quality in eastern Jilin Province based on HSI model[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(3): 140–147

[4] 刘园, 周勇, 杜越天. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2429–2440
LIU Y, ZHOU Y, DU Y T. Study on the spatio-temporal patterns of habitat quality and its terrain gradient effects of the middle of the Yangtze River Economic Belt based on InVEST model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(10): 2429–2440

[5] 金龙如, 孙克萍, 贺红士, 等. 生境适宜度指数模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2008, 27(5): 841–846
JIN L R, SUN K P, HE H S, et al. Research advances in habitat suitability index model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(5): 841–846

[6] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360–3367
HUANG C H, YANG J, ZHANG W J. Development of ecosystem services evaluation models: Research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(12): 3360–3367

[7] TAYLOR P D, FAHRIG L, HENEIN K, et al. Connectivity is a vital element of landscape structure[J]. Oikos, 1993, 68(3): 571–573

[8] YORK A M, SHRESTHA M, BOONE C G, et al. Land fragmentation under rapid urbanization: A cross-site analysis of Southwestern cities[J]. Urban Ecosystems, 2011, 14(3): 429–455

[9] FITZSIMONS J, PEARSON C J, LAWSON C, et al. Evaluation of land-use planning in greenbelts based on intrinsic characteristics and stakeholder values[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 106(1): 23–34

[10] AFSHARI M, MAFI E. Land capability assessment for regional planning using AHP and GIS at Shandiz Urban Region, Northeast Iran[J]. Environment and Urbanization ASIA, 2014, 5(1): 105–118

[11] 韦仕川, 吴次芳, 杨杨. 黄河三角洲未利用地适宜性评价的资源开发模式——以山东省东营市为例[J]. 中国土地科学, 2013, 27(1): 55–60
WEI S C, WU C F, YANG Y. The land development models in Yellow River Delta: Based on land suitability evaluation for unutilized land resources[J]. China Land Science, 2013, 27(1): 55–60

[12] 曾庆敏, 刘新平. 天山北坡经济带宜耕未利用地开发潜力分区及评价——以新疆阜康市为例[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 819–828
ZENG Q M, LIU X P. Evaluation of potential of unused land exploitation in northern Tianshan Mountain Economic Belt — A case study of Fukang City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 819–828

[13] 朱成立, 侯淑楠, 忻海飞. 江苏省宜农未利用地开垦土壤改良模式研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 50–53
ZHU C L, HOU S N, XIN H F. Soil improvement models of potential land resources suitable for agriculture in Jiangsu Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(2): 50–53

[14] 彭建, 谢盼, 刘焱序, 等. 低丘缓坡建设开发综合生态风险评价及发展权衡——以大理白族自治州为例[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1747–1761
PENG J, XIE P, LIU Y X, et al. Integrated ecological risk assessment and spatial development trade-offs in low-slope hilly land: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1747–1761

[15] 潘翔, 石培基, 吴娜. 黄土丘陵沟壑区生态风险空间识别及开发利用权衡——以兰州市为例[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1): 380–389
PAN X, SHI P J, WU N. Spatial identification of ecological risk and development balance in loess hilly and gully region: A case study of Lanzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(1): 380–389

[16] 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
FENG S, SUN R H, CHEN L D. Spatio-temporal variability of habitat quality based on land use pattern change in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4167–4179

[17] 刘春芳, 王川. 基于土地利用变化的黄土丘陵区生境质量时空演变特征——以榆中县为例[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7300–7311
LIU C F, WANG C. Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality in the loess hilly region based on land use change: A case study in Yuzhong County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7300–7311

[18] 郑新奇, 付梅臣. 景观格局空间分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010
ZHENG X Q, FU M C. Spatial Analysis of Landscape Pattern and Application[M]. Beijing: Science Press, 2010

[19] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(1): 121–125
CHEN W B, XIAO D N, LI X Z. Classification, application, and creation of landscape indices[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(1): 121–125

[20] 何鹏, 张会儒. 常用景观指数的因子分析和筛选方法研究[J]. 林业科学研究, 2009, 22(4): 470–474
HE P, ZHANG H R. Study on factor analysis and selection of common landscape metrics[J]. Forest Research, 2009, 22(4): 470–474

[21] 彭建, 王仰麟, 张源, 等. 土地利用分类对景观格局指数的影响[J]. 地理学报, 2006, 61(2): 157–168
PENG J, WANG Y L, ZHANG Y, et al. Research on the influence of land use classification on landscape metrics[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(2): 157–168

[22] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 726–736
LI Y F, LUO Y C, LIU G, et al. Effects of land use change on ecosystem services: A case study in Miyun Reservoir Watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 726–736

[23] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 183–189
PAN T, WU S H, DAI E F, et al. Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 183–189

[24] SHARP R, CHAPLIN-KRAMER R, WOOD S, et al. InVEST User' Guide[M/OL]. 2017. [2019−12−09]. http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/

[25] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 等. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3457–3466
WU J S, CAO Q W, SHI S Q, et al. Spatio-temporal variability of habitat quality in Beijing-Tianjin-Hebei area based on land use change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3457–3466

[26] 杨志鹏, 许嘉巍, 冯兴华, 等. 基于 InVEST 模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 139–147
YANG Z P, XU J W, FENG X H, et al. Effects of land use change on habitat based on InVEST model in northeast China[J]. Ecological Science, 2018, 37(6): 139–147

[27] 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
GONG J, MA X C, ZHANG L L, et al. Spatiotemporal variation of habitat quality in Bailongjiang watershed in Gansu based on InVEST model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 191–196

[28] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4–11

[29] 白杨, 郑华, 庄长伟, 等. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 711–717
BAI Y, ZHENG H, ZHUANG C W, et al. Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian Baisn: Based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 711–717

[30] 王燕, 高吉喜, 金宇, 等. 基于 2005—2015 年土地利用变化和 InVEST 模型的内蒙古巴林右旗农牧交错带生境质量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 1–10
WANG Y, GAO J X, JIN Y, et al. Habitat quality of farming-pastoral ecotone in Bairin Right Banner, Inner Mongolia based on land use change and InVEST model from 2005–2015[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(1): 1–10

[31] 谢怡凡, 姚顺波, 邓元杰,等. 延安市退耕还林(草)工程对生境质量时空格局的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 575–586
XIE Y F, YAO S B, DENG Y J, et al. Impact of the 'Grain for Green' project on the spatial and temporal pattern of habitat quality in Yan'an City, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 575–586