

基于InVEST模型的滇中城市群生境质量时空演变分析

蔡维扬^{1*}, 牛福长^{2#}, 彭康¹, 周丹¹, 唐敏¹

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²北京师范大学地理科学学部, 北京

收稿日期: 2023年5月10日; 录用日期: 2023年8月3日; 发布日期: 2023年8月15日

摘要

研究城市群的生境质量可以较好的揭示当地的生物多样性以及生态服务水平, 为维护生态系统平衡与经济发展提供依据。本文以滇中城市群为例, 使用2005年至2020年的土地利用数据, 运用InVEST模型分析滇中城市群的生境质量时空演变特征。结果表明: (1) 由于快速城镇化和工业化导致土地利用的急速变化与生境质量水平的分布及其变化具有高度相关性; (2) 2005年至2020年期间, 滇中城市群生境质量先升后降, 总体呈下降趋势; (3) 2005年至2015年生境质量整体稳定, 而2015年至2020年, 生境退化度、生境质量、生境质量分级出现了显著的变化, 生境质量0值区面积逐渐扩大。对此, 滇中城市群应该合理规划城市扩张, 进一步提高广大生态空间的生境质量, 协调城市群的社会经济发展与生态文明建设。

关键词

滇中城市群, 生境质量, InVEST模型

Spatial and Temporal Evolution Analysis of Habitat Quality of Central Yunnan Urban Agglomeration Based on InVEST Model

Weiyang Cai^{1*}, Fuchang Niu^{2#}, Kang Peng¹, Dan Zhou¹, Min Tang¹

¹Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²Department of Geographical Sciences, Beijing Normal University, Beijing

Received: May 10th, 2023; accepted: Aug. 3rd, 2023; published: Aug. 15th, 2023

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 蔡维扬, 牛福长, 彭康, 周丹, 唐敏. 基于 InVEST 模型的滇中城市群生境质量时空演变分析[J]. 地理科学研究, 2023, 12(4): 507-519. DOI: 10.12677/gser.2023.124047

Abstract

The study of habitat quality in urban agglomerations can better reveal the local biodiversity and ecological service levels, and provide a basis for maintaining the balance of ecosystems and economic development. This paper uses land use data from 2005 to 2020 to analyse the spatial and temporal evolution of habitat quality in the Central Yunnan urban agglomeration using the InVEST model. The results show that: (1) the rapid changes in land use due to rapid urbanisation and industrialisation are highly correlated with the distribution of habitat quality levels and their changes; (2) habitat quality in the Central Yunnan Urban Agglomeration rises and then falls between 2005 and 2020, with an overall decreasing trend; (3) habitat quality is stable overall from 2005 to 2015, while from 2015 to 2020, habitat degradation, habitat quality and habitat quality grading showed significant changes, and the area of the habitat quality 0 value zone gradually expanded. Therefore, the Central Yunnan Urban Agglomeration should plan urban expansion rationally to further improve the habitat quality of the vast ecological space and coordinate the socio-economic development of the urban agglomeration with the construction of ecological civilization.

Keywords

Central Yunnan Urban Agglomeration, Habitat Quality, InVEST Model

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城镇化与工业化的快速发展及其所带来的人类活动强度的增大使得人类赖以生存的生态环境压力陡然剧增, 生境质量状况引人担忧。生境质量指生态系统部分或整体对生物个体或群体提供可持续发展的能力[1], 在一定程度上可反映出区域的生物多样性[2], 表征地区生态环境不同水平[3]。而城市的无序扩张引起的土地利用的变化则可能引起生态环境水平和生境质量的下降, 从而影响经济社会的可持续发展。因此评估区域生境质量, 分析生境质量的时空演变与分异特征, 对保护生物多样性、维护生态系统的平衡和促进区域可持续发展具有重要的价值与意义[4]。

早期的生境质量研究侧重于对特定物种所在区域的生境条件进行分析, 采用实地调查的方法, 这导致研究难度大、耗时长, 且只适合小尺度区域的生境质量研究[5]。但随着 3S 技术的发展, 相关模型也被随之应用到生境质量的研究中。如 InVEST 模型(生态系统服务和权衡的综合评估)、HIS 模型(生境适宜指数)、SolVES 模型(生态系统服务社会价值)等[6] [7] [8]。其中 InVEST 模型具有易操作、可靠性高、评估准确性高和可视化能力较强等优势被广泛使用。但已有的相关研究主要集中在一些沿海热点区域或其他发达地区、流域和自然保护区等[9] [10] [11] [12], 较少对经济发展相对落后和生态环境敏感脆弱的区域展开研究。

地处云贵高原地区的滇中城市群作为西南重要的经济中心, 区域内土地利用类型丰富, 以林地、草地和耕地为主, 生物资源丰富, 具有独特的生态环境与地理区位[13]。近年来, 滇中城市群工业化和城镇化的快速发展, 建设用地的持续扩张, 使得滇中城市群本就复杂脆弱的自然生态环境进一步恶化, 诸如

石漠化、水土流失等土地退化日趋严重,威胁着滇中城市群经济社会和生态的可持续发展。而保障生态安全,进行生态修复,是滇中城市群建设生态文明的重要支撑和打造宜居城市群的要求,也是滇中城市群发展纲要的重要内容之一。然而,当前对于滇中城市群的生境质量却鲜有研究,这在一定程度上阻碍了滇中城市群的全面协调发展。因此,本文以滇中城市群为研究对象,基于2005年至2020年的土地利用数据,运用InVEST模型分析滇中城市群的生境质量时空演化特征,揭示滇中城市群生境质量的演化规律,以期对滇中城市群的国土开发和生态修复以及促进当地的社会、经济可持续发展,提高人居环境和社会福祉提供参考。

2. 研究区概况

滇中城市群地处云南省中部,位于北纬 $24^{\circ}58'$ ~ $25^{\circ}09'$,东经 $100^{\circ}43'$ ~ $104^{\circ}49'$ 之间(图1)。由昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄州以及红河州的7个县市(蒙自市、开远市、弥勒市、个旧市、建水县、泸西县、石屏县),共49个县(市)区组成。该区总面积约为 $111,402\text{ km}^2$,约占云南省的30%,常住人口约为2195万人(2020年底)。区域地形以山地和山间盆地为主,总体地势东南低、西北高,海拔在 $130\sim 4300\text{ m}$ 之间,平均海拔约 1848 m ,主要山脉多为南北走向。山地之间夹杂着众多的河流谷地与坝子,高原盆地数量居全省之首。坝子地区海拔较低,自然条件较佳。山区海拔较高,自然条件较差。该区喀斯特地貌广布,水土等自然条件较恶劣。滇中城市群的气候为亚热带季风气候,由于纬度较低、海拔较高,具有低纬高原季风气候的特点。该区湖泊主要有滇池、抚仙湖等,河流主要分为长江、珠江、红河等水系。湖泊水质较差,河流水质较好。土壤主要为红壤以及垂直地带性土壤。滇中城市群的植被主要分布为阔叶林、针叶林,以及草地、灌丛,而昆明是我国最大的花卉基地。

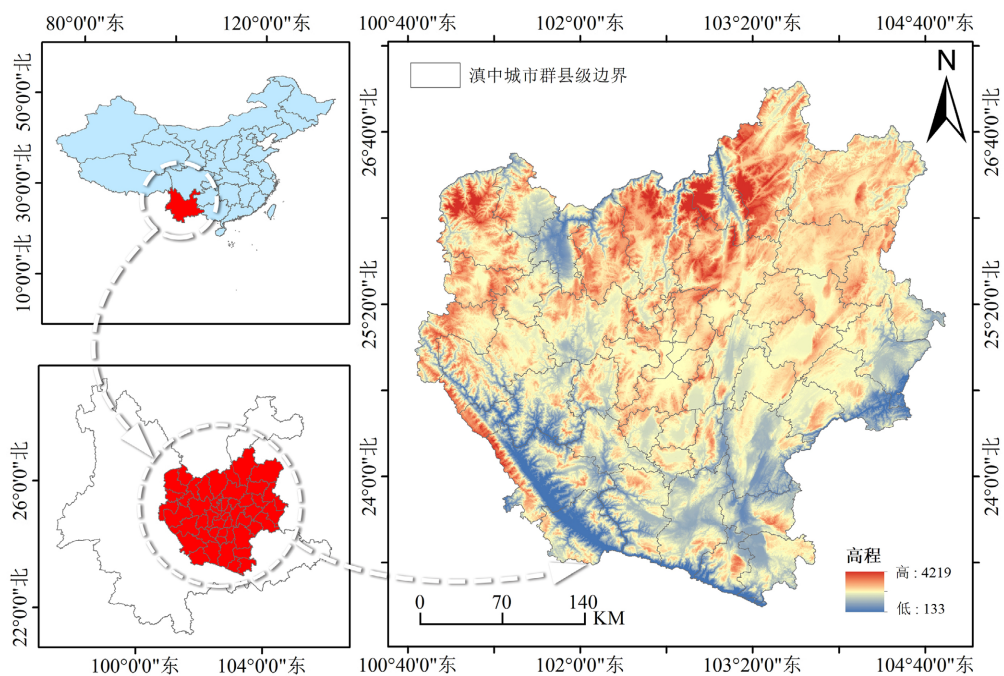


Figure 1. Location map of the central Yunnan urban agglomeration

图1. 滇中城市群区位图

滇中城市群是国家重点培育的19个城市群之一,是西南地区重要的经济增长极,目前正打造成为面向南亚东南亚的辐射中心。滇中城市群地区是云南省社会经济最发达、人口最多、城市化水平最高的地

区, 开发历史悠久、发展速度最快, 也是云南省经济、政治、科技、文化、交通的中心。该区的城市以昆明为首, 与曲靖、玉溪、楚雄等主要城市组成滇中城市群。滇中城市群地区是云南省自然和社会经济条件最佳的地区, 在全省占据重要地位, 国土面积占全省不足 30%, 却聚集了全省 60% 以上的地区生产总值, 起着引领全省发展的作用。但随着不合理的人类活动增多, 土地利用景观格局发生了剧烈变化, 人地矛盾日益突出, 石漠化、水土流失等土地退化严重, 滇中城市群面临前所未有的生态压力, 制约着经济社会发展。

3. 数据来源

行政边界数据及 DEM 数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>), 版本为 2021 公众版, 现势性较好。运行模型所需数据为: 土地利用数据, 威胁因子数据, 威胁源栅格数据以及生境威胁因子敏感性数据。2005、2010、2015、2020 年土地利用数据(Land use data)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>), 分辨率为 1km。交通数据来源于国家基础地理信息中心(<https://www.ngcc.cn/ngcc/html/>)。栅格与矢量地图的坐标系统一为 GCS_Beijing_1954。

4. 研究方法

4.1. InVEST 模型生境质量评估模型

InVEST 模型是一种综合评价模型[14], 运用 InVEST 模型中的 Habitat Quality 模块对滇中城市群 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年生境质量进行评价, 得出生境退化度空间分布图、生境质量空间分布图、生境质量分级空间分布图, 对滇中城市群生境质量的时间与空间变化做出描述与解释。生境质量主要从生境退化度、生境质量指数、生境质量分级三个指标进行评价。

模型首先计算生境退化度, 生境退化度由对威胁源的计算而得, 其公式为:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^n \sum_{l=1}^y \left\{ \frac{w_r}{\sum_{r=1}^n w_r} \right\} \times r_y \times i_{rxy} \times \beta_x \times S_{jr} \quad (1)$$

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{ramx}} \right) \quad (\text{线性衰减}) \quad (2)$$

$$i_{rxy} = \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{ramx}} \right) \times d_{xy} \right] \quad (\text{指数衰减}) \quad (3)$$

公式(1)、(2)、(3)中, D_{xj} 指 j 类土地利用中 x 栅格的生境退化程度; w_r 指威胁因子的权重[15]; r_y 指威胁因子的胁迫强度; β_x 指生境的抗干扰能力; S_{jr} 指生境类型对威胁因子的敏感性; i_{rxy} 指 y 栅格中 r 威胁因子对 x 栅格的影响; r 指威胁因子; d_{xy} 指 x 栅格与 y 栅格之间的距离; d_{ramx} 指威胁因子 r 影响的最大范围。

模型其次计算生境质量指数, 生境质量指数是通过分析土地利用类型, 以及其对于生物多样性的威胁程度计算得到[16], 其公式为:

$$Q_{xj} = H_{xj} \times \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + k^2} \right) \right] \quad (4)$$

公式(4)中, Q_{xj} 指 j 类土地利用中 x 栅格的生境质量指数; D_{xj} 指生境退化度, 即 j 类土地利用中 x 栅格的生境退化程度; H_{xj} 指 j 类土地利用中 x 栅格的生境适应性; k 指半饱和和常数。

4.2. 研究区 InVEST 模型参数确定

作为我国面向南亚、东南亚开放的重要门户地区 and 我国“两横三纵”城镇化战略格局的重要组成部分，滇中城市群在云南省和全国范围都具有重要的战略和生态价值[17]。因此根据滇中城市群实际情况，以受到人类活动影响较大的水田、旱地、城镇用地以及农村居民点用地和交通用地作为威胁因子；基于 InVEST 模型用户手册和相关案例，并结合研究区域特征对最大威胁距离(单位为 km)、权重、空间衰退类型以及威胁因子敏感性进行赋值[18] [19] [20] [21]，详情见表 1、表 2。

Table 1. Threat factor attributes

表 1. 威胁因子属性

威胁因子	最大威胁距离	权重	空间衰退类型
水田	5	0.6	线性
旱地	6	0.7	线性
城镇用地	10	1	指数
农村居民点用地	8	0.8	指数
交通用地	8	0.8	指数

Table 2. Habitat suitability and threat factor sensitivity

表 2. 生境适宜性及威胁因子敏感性

土地利用类型	生境适宜性	水田	旱地	城镇用地	农村居民点用地	交通用地
水田	0.4	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6
旱地	0.2	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6
有林地	1	0.6	0.7	0.6	0.8	0.6
灌木林	0.9	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6
疏林地	0.8	0.6	0.6	0.8	0.8	0.7
其它林地	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7
高覆盖度草地	0.8	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5
中覆盖度草地	0.7	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5
低覆盖度草地	0.6	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5
河渠	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8
湖泊	1	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8
水库坑塘	0.9	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8
永久性冰川雪地	0.3	0	0	0	0	0
滩地	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8
城镇用地	0	0	0	0	0	0
农村居民点用地	0	0	0	0	0	0
其它建设用地	0	0	0	0	0	0
沼泽地	0.9	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7
裸岩石质地	0.5	0	0	0	0	0

为更好反映土地利用变化对滇中城市群生境质量的影响，结合生境质量运算结果、研究区实际情况及已有研究[18]，采用自然断点法对生境质量值进行等级划分，把滇中城市群生境质量划分为 5 级，分别为差[0~0.2]，较差[0.2~0.4]，中[0.4~0.6]，良[0.6~0.8]，优[0.8~1]。

5. 研究结果与分析

5.1. 生境退化度时空演变分析

生境退化度高，即生境退化的情况严重，受威胁因子胁迫大。根据图 2，从空间分布格局来看生境退化度总体表现为中部高四周低，尤其昆明市的外围地带与曲靖市的南部地区生境退化度较高，主要因为一是受城市建设用地的不断向外扩张的影响，二是这些地区人口密度大、耕地和城镇用地分布较为集中，人类活动影响大。而滇中城市群边缘地带由于山地地区林地分布广，人口密度相对小，人类活动干扰较少，则主要为生境退化度低值区。

从时间变化来看，2005 年至 2015 年生境退化度的取值范围为[0~0.174227]，2015 年至 2020 年生境退化度的取值范围为[0~0.159702]，表明滇中城市群的总体生境退化程度在近年来稍微下降。2005 年至 2015 年，生境退化度总体变化不大、分布较为稳定，生境退化度的极低值区范围在昆明市区与曲靖市区不断增加。2015 年至 2020 年，生境退化度具有一定程度的变化，主要反映为生境退化度极低值区的范围显著扩大，范围扩大地区主要是昆明的五华区、盘龙区、官渡区、西山区、呈贡区、安宁市，曲靖的麒麟区、沾益区，玉溪的红塔区，楚雄市，开远市的市区，以及安宁、嵩明、陆良、罗平、建水的城区。

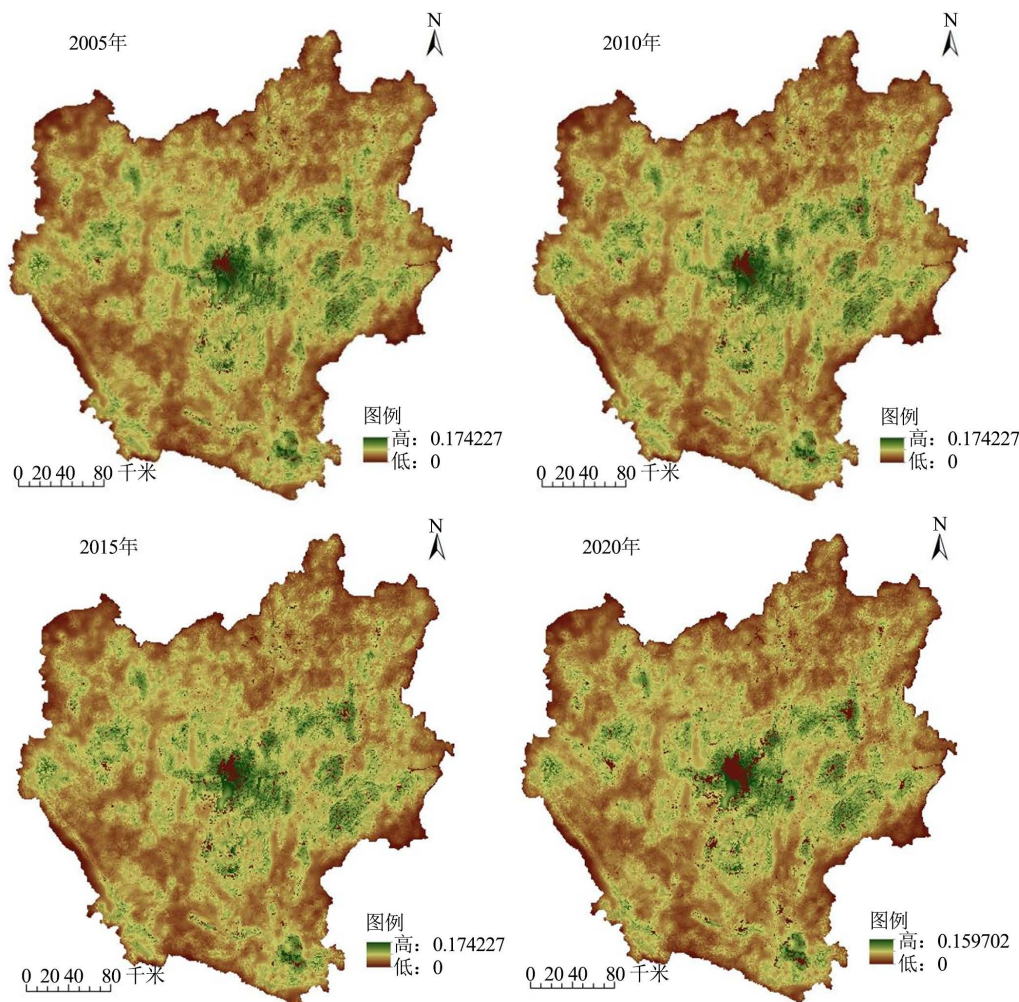


Figure 2. Evolution of habitat degradation degree in the central Yunnan urban agglomeration from 2005 to 2020
图 2. 滇中城市群 2005~2020 年生境退化度演变

5.2. 生境质量变化

5.2.1. 生境质量时空变化

生境质量指数的取值范围为 0 至 1，数值越接近 1，表明生境质量越高，生物多样性越丰富，生态环境越好。根据图 3，2005 年至 2020 年滇中城市群的生境质量平均值分别为 0.52866、0.528693、0.527761 和 0.525947，表明滇中城市群生境质量整体呈现先升后降的趋势。2005 年至 2010 年，滇中城市群的生境质量平均值保持在高位水平，2010 年生境质量平均值达到最高，这与政府的环境规划有密切关系，如 2005 年印发的《云南省环境保护“十一五”规划和 2020 年远景目标基本思路》。2010 年至 2020 年由于国家战略调整和地区加快发展建设，生境质量平均值持续下降，2020 年平均值降至最低。

结合图 3 和图 4，从时间变化来看，2005 年至 2010 年，生境质量指数总体变化不大，分布较为稳定。2010 年至 2015 年，生境质量指数有一定变化。2020 年，生境质量指数变化较大。2015 年以来，由于城市化的迅速推进，城市地域快速向外扩张，使生境质量指数低值区不断向外扩展。2015 年至 2020 年，生境质量指数低值区新增地域与城市扩张的新增地域具有较高的耦合性。2005 年至 2020 年，生境质量指数极低值区除昆明市区、曲靖市区外，生境质量指数都略微增高，表明城市建设用地地区不断改进其生态环境，如城市绿地、公园等数量的增加。2005 年至 2020 年，滇中城市群生境质量指数极高值区的生境质量指数普遍有略微增高，表明林地的生境质量不断好转，对林地的生态保护得到落实。

如图 4 所示，从空间分布格局来看，滇中城市群整体生境质量由周边向中部逐步降低。生境质量指数较低的地区主要分布在滇中城市群的中部地带，主要是昆明市的南部和曲靖市的西南部，该区人口较为密集、人类活动频繁、城镇化和工业化水平较高。生境质量指数高值区主要分布在滇中城市群的西北、西南、东南等边缘地带，主要为哀牢山、大姚县百草岭地区，该区主要为山地地区，其林地面积大、植被保存完好。

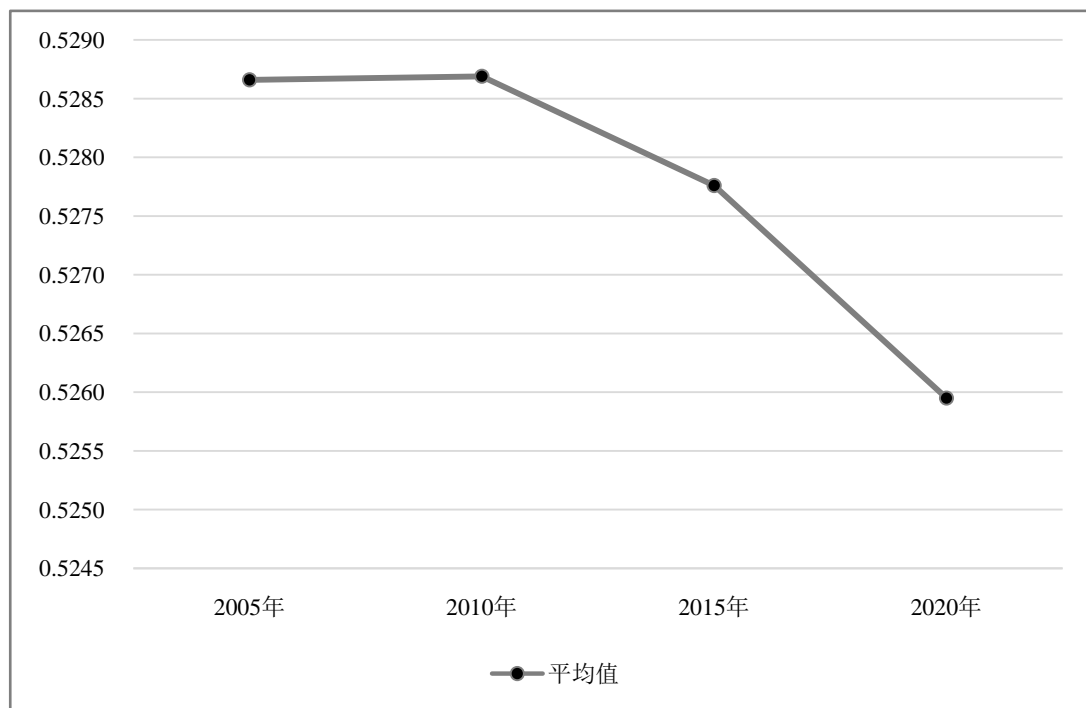


Figure 3. Average habitat quality of central Yunnan urban agglomeration from 2005 to 2020

图 3. 滇中城市群 2005~2020 年生境质量平均值

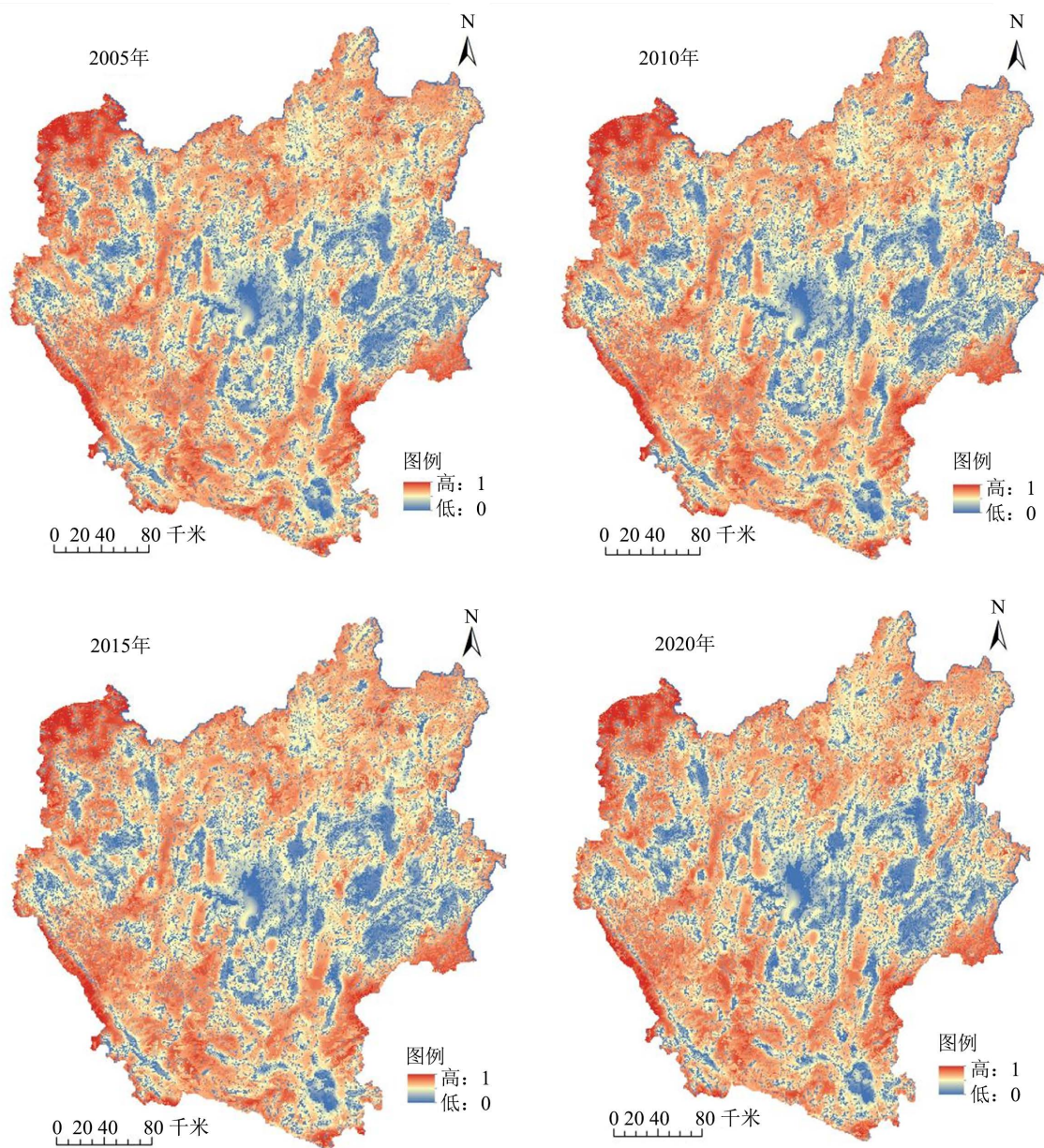


Figure 4. Habitat quality evolution of the central Yunnan urban agglomeration from 2005 to 2020
图 4. 滇中城市群 2005~2020 年生境质量演变

5.2.2. 生境质量 0 值区时空变化

在 1 km 栅格图层中, 生境质量为 0 值的栅格主要为城镇用地地区, 众多 0 值的聚集区为主要城市的市区。据此, 可以根据生境质量 0 值区的时间空间变化分析滇中城市群城市范围的扩展及城市之间的联结。根据图 5, 2005 年至 2010 年, 滇中城市群生境质量 0 值区总体变化不明显。2010 年至 2015 年, 滇中城市群生境质量 0 值区的变化主要体现为昆明、曲靖市区向南扩展, 环滇池的昆明主城区、呈贡、晋宁、安宁之间的城镇用地地区逐渐密集。2015 年至 2020 年, 滇中城市群生境质量 0 值区的变化幅度最大, 主要体现为昆明市区、安宁、曲靖市区、玉溪、楚雄、蒙自、开远、嵩明、陆良、罗平、建水等县市市区的向外扩展; 以及昆明主城区、呈贡、晋宁、安宁之间的城镇用地相连成片, 昆明主城区通过空

港区与嵩明城区的连接，曲靖麒麟城区与沾益城区连接，玉溪市市区与峨山县城区的连接，蒙自市区与个旧市区的连接。

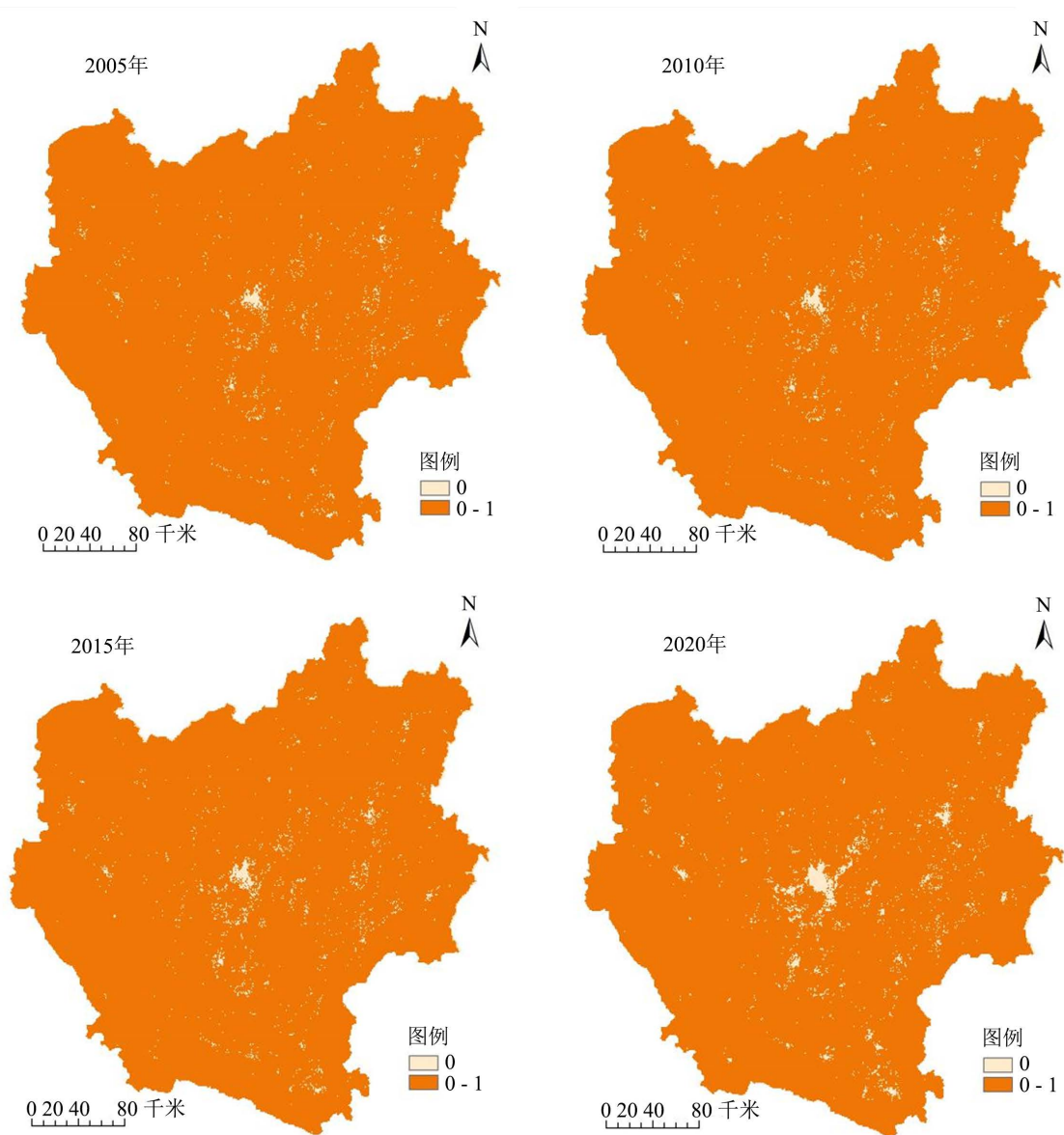


Figure 5. Evolution of the zero-value area of habitat quality in the central Yunnan urban agglomeration from 2005 to 2020

图 5. 滇中城市群 2005~2020 年生境质量 0 值区演变

5.2.3. 生境质量分级的面积变化

根据图 6 以及图 7，2005 年，2010 年，2015 年，2020 年，滇中城市群生境质量分级为良的区域面积占全区面积的比重分别为 40.149%、40.185%、40.149% 和 39.868%，分级为优的区域面积占全区面积的比重分别为 8.192%、8.209%、8.214% 和 8.812%。因此，2005 年至 2020 年，滇中城市群生境质量分级为良与优的面积占全区面积的比重长期约为 48%，生境质量分级为中的面积占全区面积的比重长期约为 25%，生境质量分级为差与较差的面积占全区面积的比重长期约为 27%，表明滇中城市群生境质量尚有

大幅度提升的空间。2005年至2020年,生境质量分级为差的面积变化最大,生境质量分级为良的面积变化最小;生境质量分级为差的面积占比上升了1.1%,生境质量分级为较差的面积占比下降了0.9%,生境质量分级为中的面积占比下降了0.5%,生境质量分级为良的面积占比下降了0.3%,生境质量分级为优的面积占比上升了0.6%。表明滇中城市群生境质量总体处于一般水平,较为稳定。

2005年至2015年,滇中城市群生境质量分级总体变化不明显。2015年至2020年,滇中城市群生境质量分级总体变化较为明显。由较差转为差的地区主要为昆明市、曲靖的市区和宣威市以及玉溪市。生境质量分级由良转为优的地区主要为玉溪市的峨山县。生境质量分级由良转为中的地区主要为曲靖市的会泽县。

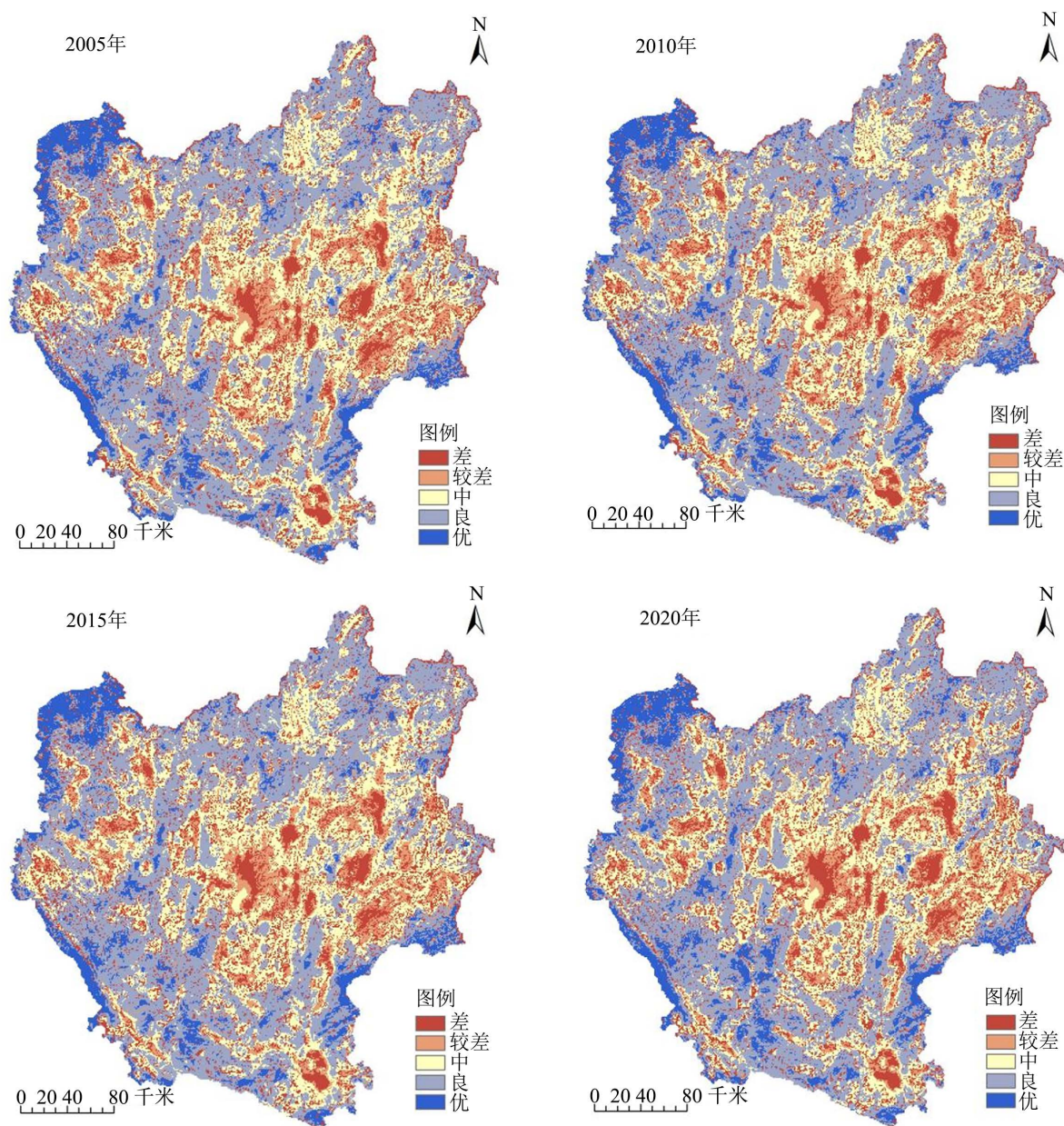


Figure 6. Evolution of habitat quality classification in the central Yunnan urban agglomeration from 2005 to 2020
图6. 滇中城市群 2005~2020 年生境质量分级演变

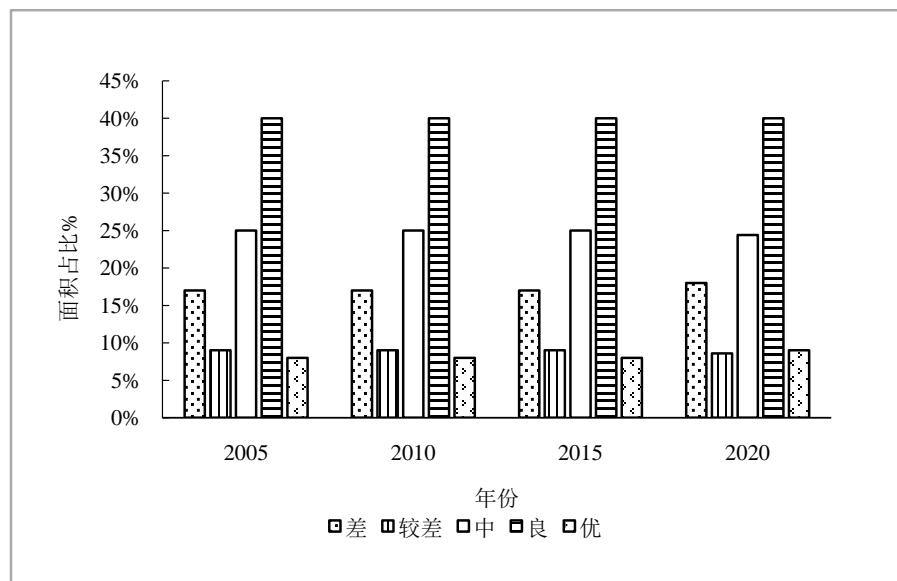


Figure 7. The proportion of habitat quality classification in the central Yunnan urban agglomeration from 2005 to 2020

图 7. 滇中城市群 2005~2020 年生境质量分级比重

6. 结论与讨论

分析滇中城市群的生境质量时间空间变化特征，对于生态环境脆弱敏感地区的生态空间保障、协调绿色发展具有重要意义。文章使用 InVEST 模型的生境质量模块分析滇中城市群的生境质量时间空间演变，得到以下结论：

(1) 2005 年至 2015 年，滇中城市群的生境退化度、生境质量、生境质量分级变化较小。而 2015 年至 2020 年，这三个指标较前期变化相对较大。其原因为滇中城市群前期的土地利用变化不大，后期由于城市化迅速推进，区域土地利用在深度和广度上均发生转型，引起生境质量的变化。

(2) 2005 年至 2020 年，生境质量指数总体为中等水平，变化幅度较小。生境质量平均值出现先增后降的趋势，2010 年达到最高，2020 年降至最低。

(3) 滇中城市群生境退化度与 0 值区的变化主要发生在环滇池地区。主要原因为环滇池地区是滇中城市群城镇化最为快速的地区，同时也是云南省最大城市昆明所处的地区，城市扩张与城市建设用地相互连接最为明显。

(4) 2005 至 2020 年，滇中城市群生境质量分级的面积占比从大到小依次为良，中，差，较差，优。生境质量各分级之间的转移整体变化不大，在城市扩张的区域生境质量分级转移为差。

滇中城市群生境质量退化与土地利用方式的转变关系密切，主要表现为建设用地的扩张导致一定数量的耕地、林地、草地以及水域和未利用地面积的减少。城市群外围边缘地带生境质量相对较高且保持稳定主要因为这些地区大多属山地地形，林地广布、人口密度不大，受人类生产生活干扰影响相对较小。

滇中城市群整体生境质量变化是国家和地区发展引起国土空间变化的必然现象。作为面向南亚东南亚辐射中心、中缅经济走廊建设核心以及西南对外开放的排头兵，滇中城市群在实现地区快速发展的同时，生态环境不可避免地遭受到一定影响。滇中城市群是云南建设中国最美丽省份的重要支撑区域，而优质的生态环境是其核心竞争力。因此，结合研究区的发展现状和生境质量分析结果提出以下建议：(1) 重点加强生境质量低值区的生态建设与修复工程，合理调整产业结构，控制建设用地的无序扩张；(2) 应该坚持统筹区域的山水林田湖草沙治理，不仅须增加生态空间的面积，还应提升其质量；(3) 实行严格的

生态环境保护制度, 构筑区域生态安全格局, 加快推进重点生态功能区建设, 加大自然保护区保护力度; (4) 严守生态保护红线, 保护永久基本农田, 划定城镇用地建设用地的开发边界。2020年7月云南省政府印发了《滇中城市群发展规划(2019~2035年)》, 要求到2035年滇中城市群绿色生态格局稳步提升, 城乡空间格局大幅度优化, 生态文明建设形成新支撑。随着生态建设和可持续协调发展的推进, 可预测, 今后滇中城市群的生境质量将在得到稳定和维持的基础上持续好转。

基金项目

云南师范大学研究生科研创新基金项目(YJSJJ23-B137); 北京师范大学博士生学科交叉基金项目(BNUXKJC2204)。

参考文献

- [1] 王建华, 田景汉, 吕宪国. 挠力河流域河流生境质量评价[J]. 生态学报, 2010, 20(2): 481-486.
- [2] 张华兵, 高卓, 王娟, 等. 基于“格局-过程-质量”的盐城滨海湿地生境变化分析[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4749-4759.
- [3] Fellman, J.B., Hood, E.W., Dryer, W. and Pyare, S. (2015) Stream Physical Characteristics Impact Habitat Quality for Pacific Salmon in Two Temperate Coastal Watersheds. *PLOS ONE*, **10**, e0132652. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132652>
- [4] 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.
- [5] 欧阳志云, 刘建国, 肖寒, 等. 卧龙自然保护区大熊猫生境评价[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1869-1874.
- [6] 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1125-1136.
- [7] 金龙如, 孙克萍, 贺红土, 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.
- [8] 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.
- [9] Nelson, E., Mendoza, G., Regetz, J., et al. (2009) Modeling Multiple Ecosystem Services, Biodiversity Conservation, Commodity Production, and Tradeoffs at Landscape Scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **7**, 4-11. <https://doi.org/10.1890/080023>
- [10] Leh, M.D.K., Matlock, M.D., Cummings, E.C. and Nalley, L.L. (2013) Quantifying and Mapping Multiple Ecosystem Services Change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **165**, 6-18. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.12.001>
- [11] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 12-22.
- [12] 陈妍, 乔飞, 江磊. 基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的评估研究——以北京为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 553-562.
- [13] 陈相标, 丁文荣, 李孝川. 滇中城市群土地利用转型及生态系统服务价值交叉敏感性分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 233-241.
- [14] 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.
- [15] 傅春, 王乐志, 邓俊鹏, 等. 不同影响因素对鄱阳湖流域生境质量变化特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(11): 1-8, 23.
- [16] 邱天琦, 王向荣. 基于 InVEST 模型的长株潭城市群生境质量时空演变分析研究[J]. 林业资源管理, 2022(5): 99-106.
- [17] 李星, 周京春, 金婷婷, 等. 滇中城市群土地利用/覆盖变化(LUCC)空间模拟研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1318-1329.
- [18] 高庆彦, 潘玉君, 刘化. 基于 InVEST 模型的大理州生境质量时空演化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(3): 402-408.
- [19] 廖珍梅, 王炬. 基于 InVEST 模型的滇池流域生境质量评估[J]. 三峡生态环境监测, 2022, 7(2): 42-52.

-
- [20] 刘汉仪, 林媚珍, 周汝波, 等. 基于 InVEST 模型的粤港澳大湾区生境质量时空演变分析[J]. 生态科学, 2021, 40(3): 82-91.
- [21] 朱淑娴, 李丽, 邢璐, 等. 滇西北地区自然村对滇金丝猴生境质量的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 1213-1223.