

南四湖流域 1980—2015 年土地利用变化及其对流域生境质量的影响*

张大智¹, 孙小银^{1**}, 袁兴中², 刘 飞¹, 郭洪伟¹, 徐 燕¹, 李宝富¹

(1: 曲阜师范大学地理与旅游学院, 南四湖湿地生态与环境保护山东省高校重点实验室, 日照 276826)

(2: 重庆大学资源及环境科学学院, 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 生境质量在一定程度上决定了区域生物多样性维持能力的高低, 评估区域生境质量对土地利用/覆被变化的响应, 可以间接衡量区域生物多样性维持功能的时空变化, 为生物多样性保护提供定量参考. 本文以南四湖流域为例, 运用 InVEST-Habitat Quality 模型模拟评价 1980—2015 年流域生境质量的时空变化, 定量评估湖区退耕还湿还林和丘陵地区退耕还林 2 种政策情景对区域生境质量改善的效果. 结果表明: 35 a 间流域耕地、林地和草地大量转化为建设用地, 城市建设用地增长 40.23%, 湖泊面积减少 35.56%, 主要转化为渔业坑塘; 南四湖流域整体生境质量处于较低水平, 近 35 a 来快速发展的工农业生产和不断扩张的城市用地使得流域生境质量呈现降低趋势, 当前平均生境质量为历年最低 (0.20). 环境保护力度和人类活动剧烈程度的差异导致生境质量在空间上呈现出西部平原区 (0.19) < 东部丘陵山区 (0.44) < 南四湖湖区 (0.81) 的分布特征. 近 35 a 来生境稀有度 (即生境保存完整性指数) 较高的区域主要是湖区主体和流域东部丘陵山区, 但部分边缘湖区生境稀有度指数却极低, 受人类活动干扰剧烈, 主要原因在于沿湖渔业养殖和农业活动. 定量评估湖区退耕还林还湿和流域丘陵旱地退耕还林 2 种政策情景对生境质量的改善效果, 结果表明湖区退耕还湿还林能使湖区生境质量上升 9.21%, 而丘陵旱地退耕还林可使流域平均生境质量提高 16.75%.

关键词: InVEST-Habitat Quality 模型; 南四湖流域; 土地利用变化; 生境质量; 生境稀有度

Land use change and its impact on habitat quality in Lake Nansi Basin from 1980 to 2015

ZHANG Dazhi¹, SUN Xiaoyin^{1**}, YUAN Xingzhong², LIU Fei¹, GUO Hongwei¹, XU Yan¹ & LI Baofu¹

(1: College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Key Laboratory of Lake Nansi Wetland Ecological and Environmental Protection in Shandong Province, Rizhao 276826, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: Habitat quality determines the capacity of regional biodiversity conservation. Assessing the response of regional habitat quality to land use changes can indirectly measure the temporal and spatial changes of regional biodiversity maintenance function and provide a quantitative reference for biodiversity conservation. In this paper, the InVEST-Habitat Quality model was used to simulate the temporal and spatial changes of habitat quality in Lake Nansi Basin from 1980 to 2015. Quantitative assessment the effect of two policy scenarios of returning farmland to forest in hilly areas and returning farmland to forest and wetland in the lake area on the improvement of regional habitat quality. The results showed that the cultivated land, forest land and grassland were transformed into a large number of construction land during 35 years, urban land increased by 40.23% as well as lake area decreased by 35.56% which were mainly converted into reservoir pond. The overall habitat quality of the Lake Nansi Basin is at a low level due to the rapidly development of the industrial and agricultural production as well as the expanding urban land use in the past 35 years, and the current habitat quality is the lowest (0.20). The difference of the intensity of the environmental protection and the intensity

* 教育部人文社科一般项目 (14YJCZH138)、国家自然科学基金项目 (41471389)、山东省中青年科学家奖励基金项目 (BS2013NY009) 和山东省高校科技计划项目 (J13LF02) 联合资助. 2017-02-18 收稿; 2017-06-23 收修改稿. 张大智 (1993 ~), 男, 硕士研究生; E-mail: m15954135217@163.com.

** 通信作者; E-mail: xiaoyin-sky@163.com.

of human activities led to the spatial distribution of habitat quality showed the trend of western plain area (0.19) < eastern hilly and mountainous area (0.44) < Lake Nansi area (0.81). In the past 35 years, the area of highly habitat rarity (ie, Habitat Conservation Integrity Index) is mainly in the lake area and the eastern hilly area of the basin. However, the Habitat Rarity Index in some marginal lakes is very low, which is disturbed by human activities. The main reason is that Lake fisheries farming and agricultural activities Scenario analysis showed that returning farmland to forest and wetland in the lake area could increase the average habitat quality by 9.21% while that returning farmland to forest in the hilly area could increase the average habitat quality by 16.75%.

Keywords: InVEST-Habitat Quality model; Lake Nansi Basin; land use change; habitat quality; habitat rarity

物种或种群所占有的资源、环境条件以及使这些物种或种群生存发展的空间共同组成了生境。生境质量指生态系统为个体、种群或群落提供生存发展条件的能力,其质量的高低取决于可供生物生存、繁衍和发展的自然资源的丰富程度^[1]。生境的破碎、退化和丧失会直接导致生物多样性的减少^[2-4]。生境质量在一定程度上决定区域生物多样性维持能力的高低,对其开展评估是生物多样性保护和自然资源合理利用的基础。土地利用变化集中体现了人类活动的强度变化,被认为是威胁生境质量最重要的影响因子^[2,5]。据统计,自17世纪工业革命以来,全球有39%的陆地生境被耕地和城市所取代,另外还有37%受到退化和破碎化的威胁^[4]。深入分析区域生境质量的变化趋势,探讨生物多样性维持功能对土地利用变化的响应,可以为区域生态安全格局的构建和土地资源的可持续利用提供理论依据和数据支撑。

目前,国内外主要采用以下2种方法开展生境质量评价,即通过生物多样性分布数据结合相关生境指标的综合评价法^[6-9]和基于生物物理参数建立的生境适宜度模型(Habitat suitability model, HSM)模拟评价法^[10-11]。综合评价法受制于调查所需人力和物力,大多数只能局限于小尺度的自然保护区或河流等;而生境适宜度模型则基于生物群落结构与其栖息地环境特征的函数关系建立模型,以栖息地环境特征参数替代物种结构数据来模拟评估生境质量,无需生物多样性分布数据,因而广受青睐^[4]。近年来,国内外许多学者运用机理模型^[12-13]、回归模型^[14]和生态位模型^[15]等生境适宜度模型结合3S技术围绕某些特定物种进行了生境质量评价,其中InVEST模型的Habitat Quality子模型以其强大的空间分析能力和能够进行多目标权衡的优势而备受关注,InVEST-Habitat Quality模型以土地利用/覆被信息和生物多样性胁迫因子为基础开展生境质量评价^[16],进而评估生物多样性维持功能。目前该模型在国内外已有不少应用,如Terrado等^[17]基于InVEST模型研究了Llobregat River流域陆地和淡水生境质量格局以及未来发展情景对生境质量的影响;Leh等^[18]运用InVEST模型研究了2000—2009年土地利用变化对加纳和科特迪瓦两国生境质量的影响;包玉斌等^[19]运用InVEST模型对陕西黄河湿地自然保护区的生境质量进行评估;吴健生等^[20]运用InVEST模型对京津冀生境质量进行总体评估,并分析了生境质量格局的时空分异性。

InVEST-Habitat Quality模型能够评估不同土地覆被的生境分布和退化情况,为生物多样性保护和土地资源开发利用之间的权衡决策提供量化参考,是实现区域生态经济协调发展的有力决策工具。鉴于此,本文选择人—地关系紧张而生态保护地位突出的南四湖省级自然保护区为研究对象,运用InVEST-Habitat Quality模型分析自改革开放35 a以来(1980—2015年)土地利用变化状况下的南四湖流域生境质量格局和演变特征,识别生物多样性优先保护区域,为区域土地资源的可持续利用提供理论依据和数据支撑。模拟预测土地管理和生态保护措施对生境质量的影响,以期为南四湖流域生态保护与资源管理决策提供数据基础。

1 研究区概况

南四湖流域(34°51′~36°02′N, 114°65′~117°52′E)属于淮河流域沂沭泗河水系(图1),地处暖温带半湿润地区,地跨山东、河南、安徽和江苏四省,但南四湖湖区和绝大多数入湖河流位于山东省境内。流域总面积 $3.18 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中山东省境内 $2.57 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布在菏泽、枣庄、济宁市以及泰安市的宁阳县。以京杭大运河和南四湖湖区为界,湖区东侧为鲁中南低山丘陵和山前冲洪积平原区,湖区西侧为冲击而成的黄泛平原,地势东高西低。南四湖湖身呈狭长带状,淤积于这2大地貌单元的交接地带,由南阳、昭阳、独山、微山4个相连成片的湖组成,是我国北方地区最大的淡水湖。南四湖是山东省省级自然保护区,被列入《中国重要湿地名录》,保护区范围主要包括湖泊湿地、岛屿、相邻水田和集水面山林组成的自然综合体及其生态系统。南四湖有绿藻和硅藻等浮游植物共计46科116属,水生维管束植物108科538种,如芦苇和轮叶黑藻

遍布全湖. 野生动物中青蛙、蛇、蝙蝠和鼠类分布较广. 鸟类共有 205 种, 其中国家一、二级重点保护鸟类主要有大天鹅、灰鹤、鸳鸯等 26 种, 山东省重点保护鸟类 35 种, 列入《中国与日本保护候鸟及其栖息环境协定》中的 227 种重点保护鸟类南四湖有 109 种, 占 48%^[21-23].

南四湖流域作为典型农业流域, 是山东省重要粮食产区. 城市用地面积的快速扩张、集约化的农业生产以及快速发展的工业活动, 对流域生态系统和生物多样性保护造成了巨大压力. 近年以来南四湖流域的林地和草地面积持续减少, 流域非点源污染日趋严重, 人类干扰强度增加, 流域生境质量受到较大威胁. 分析探讨流域生境质量演化特征并提出相关建议, 有利于流域生态环境的改善, 促进可持续发展.

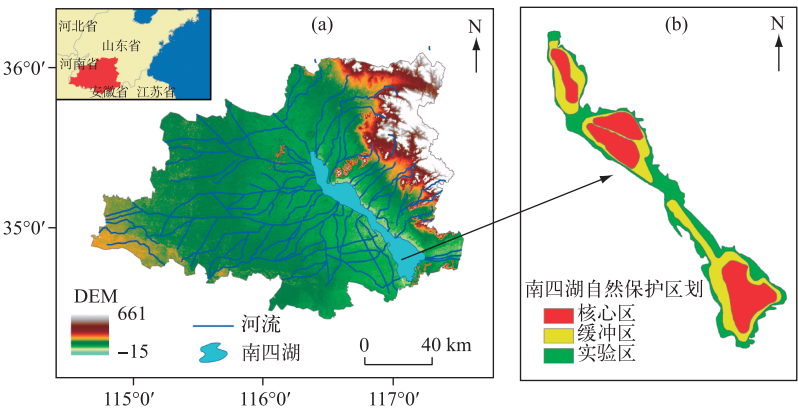


图 1 南四湖流域位置(a)和南四湖自然保护区划图(b)

Fig.1 Location of Lake Nansi Basin(a) and the provincial nature reserve of Lake Nansi (b)

2 研究方法和数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 土地利用变化分析 运用 ArcGIS 空间分析功能, 将 1980、2000 和 2015 年的土地利用数据进行叠加分析, 建立土地利用转移矩阵从而分析南四湖流域土地利用变化特征. 土地利用转移矩阵具体方法参考文献 [20,24-25].

2.1.2 生境质量模拟和分析 InVEST-Habitat Quality 模型的基本原理是将不同的土地利用/覆被类型视作相应的生态系统类型或人类活动干扰因子, 依据各生态系统类型对动植物的生境适宜度和人类干扰因子的威胁强度来模拟评估生境质量^[16]. 模型假设生境质量好的区域也具有丰富的生物多样性, 生境质量的空间分布即代表生物多样性的空间分布. 该模型的计算以土地利用类型为基础, 生境质量具体计算公式如下^[16]:

$$Q_{xy} = H_j [1 - (D_{xy}^z / (D_{xy}^z + k^2))] \tag{1}$$

式中, Q_{xy} 是土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量; D_{xy} 是土地利用类型 j 中栅格 x 的生境胁迫水平; H_j 为土地利用类型 j 的生境适合度; k 是半饱和常数, 取 D_{xy} 最大值的一半.

南四湖流域为典型农业流域, 城区扩展和工、农业活动等为区内生境的主要威胁因子. 根据这一实际情况, 本文选择工业、城市、丘陵农业、平原农业、道路系统(包括铁路、国道高速和省道等)为主要生境胁迫因子. 1980 年流域生境质量模拟不考虑道路交通系统这一威胁因子, 因为据文献 [25] 可知, 1980s 山东省路网密度低、日交通运输量少, 省级以上公路密度全省平均 0.0163 km/km², 而南四湖流域处于全省经济较落后地区, 其道路交通水平低于全省平均水平,

表 1 胁迫因子影响范围及权重

Tab.1 Maximum distance and weight of the threats affecting habitat quality

胁迫因子	最大影响距离/km	权重
平原农业	6	0.75
丘陵农业	8	0.85
城市	10	0.90
工业	12	0.95
铁路	5	0.60
国道高速	3	0.60
省道	2	0.50

道路交通系统对流域生境质量影响小,远低于 2000 年和 2015 年,故忽略不计.

上述各类胁迫因子的影响范围、权重以及不同生境类型对胁迫因子的敏感程度等参数的设置(表 1、表 2),主要依据 InVEST 模型指导手册(InVEST VERSION 3.3.2 User's Guide)^[16]、国内外同类研究^[10,17]和专家打分法相结合. 不同生境类型的生境适宜度(表 2)则依据 InVEST 模型指导手册^[16]和谢高地等^[27-28]对中国生态服务价值当量中的生物多样性赋值标准的研究和国内外同类研究^[10,17]等进行设置.

表 2 不同生境类型对威胁因子的敏感度
Tab.2 The sensitivity of habitat types to each threat factor

生境类型	生境 适宜度	平原 农业	丘陵 农业	城市	工业	铁路	国道高速	省道
林地	0.95	0.70	0.80	0.90	0.95	0.75	0.70	0.60
灌木林	0.60	0.60	0.50	0.60	0.65	0.75	0.70	0.60
疏林地	0.50	0.50	0.35	0.50	0.55	0.45	0.40	0.30
各类园地和未造林地	0.40	0.45	0.50	0.50	0.55	0.35	0.30	0.20
高覆盖度草地	0.80	0.45	0.70	0.50	0.55	0.60	0.30	0.20
中覆盖度草地	0.50	0.40	0.50	0.40	0.45	0.50	0.20	0.10
低覆盖度草地	0.30	0.35	0.50	0.30	0.35	0.35	0.30	0.20
河渠	0.90	0.75	0.80	0.90	0.95	0.75	0.70	0.60
湖泊	0.90	0.70	0.80	0.90	0.95	0.75	0.70	0.60
水库坑塘	0.90	0.70	0.80	0.90	0.95	0.75	0.70	0.60
滩地	0.90	0.70	0.50	0.70	0.75	0.75	0.70	0.60
沼泽地	1.00	0.75	0.85	0.70	0.75	0.90	0.60	0.50
丘陵水田	0.25	0.30	0.30	0.50	0.55	0.45	0.60	0.50
平原水田	0.25	0.30	0.30	0.50	0.55	0.40	0.40	0.30
丘陵旱地	0.15	0.30	0.30	0.50	0.55	0.35	0.35	0.25
平原旱地	0.15	0.30	0.30	0.50	0.55	0.30	0.30	0.20

2.1.3 生境稀有度 生物多样性保护规划中,生境稀有度(Habitat Rarity)越高,其受到关注和保护的优先度也越高^[16]. InVEST 模型的生境稀有度计算基于以前某时期的土地利用格局,以其为参考基准开展评估. 本文选择 1980 年土地利用覆被数据作为生境稀有度评价的参考基准,原因在于 1980 年流域生境质量相对较好,随后农村开始实行土地承包责任制,农业活动开始增强;经济上也开始实行改革开放,流域工业化、城市化逐渐加快,相关生态环境问题出现.

2.2 数据来源与处理

本研究采用的数据包括 1980、2000 和 2015 年的土地利用数据(1:10 万)、南四湖流域 DEM 数据(30 m×30 m)、南四湖流域县级行政区划和道路交通系统空间信息数据. 其中,土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn/>),DEM 数据来自美国马里兰大学全球土地覆被数据库(<http://glcfapp.glcf.umd.edu/>),行政区矢量数据来源于 1:100 万全国基础地理信息,道路交通系统空间数据来源于 2015 年山东省交通地图(1:75 万)和 2000 年山东省交通旅游图(1:100 万)矢量化,并结合 Google Earth 高分辨率遥感影像进行校正.

3 结果与讨论

3.1 近 35 a 流域土地利用与道路系统变化

南四湖流域当前(2015 年)土地利用类型以耕地和建设用地为主,分别占流域总面积的 69.53% 和 18.31%. 35 a 间,全流域高达 2158.72 km²的耕地转变为建设用地,导致建设用地比 1980 年增长了 40.25%. 1980—2000 年林地、草地面积分别增长 4.36% 和 2.75%,但在 2000—2015 年间却分别大幅减少了 26.83% 和 24.73%,主要转换为耕地和建设用地,说明进入新世纪以来人类开发利用自然环境的强度增加;建设用地在

近 15 a 的增长幅度是前 20 a 的 2.12 倍,近 15 a 间南四湖流域的城市化步伐加快(表 3)。

南四湖自然保护区当前(2015 年)土地利用类型主要以湖泊和水库坑塘为主,共占保护区总面积的 83.53%,但 1980 年以来南四湖湖泊面积减少了 35.56%且减少面积的 89.79%转化为水库坑塘,表明沿湖渔业养殖是导致湖泊面积萎缩的主要因素(表 3)。当前南四湖自然保护区内建设用地所占面积比例总体极小(0.23%),但是自 1980 年以来已经增长了 6.32 倍。分析表明,人类的渔业活动以及城市化进程是南四湖自然保护区的主要干扰因子。

表 3 南四湖流域 1980—2015 年土地利用转移矩阵(km²)
Tab.3 Land use transition matrix of Lake Nansi Basin from 1980 to 2015

时间	土地利用类型	2000 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1980 年	耕地	20769.62	48.78	51.66	35.73	554.29	0.10
	林地	19.73	823.75	1.62	1.16	7.33	0
	草地	30.82	7.70	1491.33	2.18	0.77	0.86
	水域	82.99	3.05	29.26	1384.75	2.04	1.22
	建设用地	95.84	7.52	1.52	1.02	3737.30	0
	未利用地	9.53	0	0.44	121.91	0.03	108.13
时间	土地利用类型	2015 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000 年	耕地	18973.29	15.27	30.61	247.76	1738.93	2.24
	林地	219.85	617.96	15.30	5.67	32.22	0.80
	草地	358.39	8.45	1126.50	24.58	55.21	2.22
	水域	121.04	4.23	5.67	1387.33	19.63	8.93
	建设用地	754.90	2.85	5.20	8.23	3528.72	1.56
	未利用地	38.34	3.73	2.44	2.05	14.32	49.40

随着经济社会的迅速发展和城市化的快速推进,流域内国道高速、省道和铁路等道路系统不断完善,不少县道、省道分别升级为省道或国道,新的道路也有所增加(图 2)。路网密度由 2000 年的 0.1465 km/km² 增加至 2015 年的 0.1731 km/km²。路网系统空间变化显示,2015 年流域东部除了新增 1 条铁路以外,省级及以上道路变化不大;流域西部平原地区经济发展相对落后,近 15 a 来大力发展交通以拉动经济增长,因此路网密度明显增加。

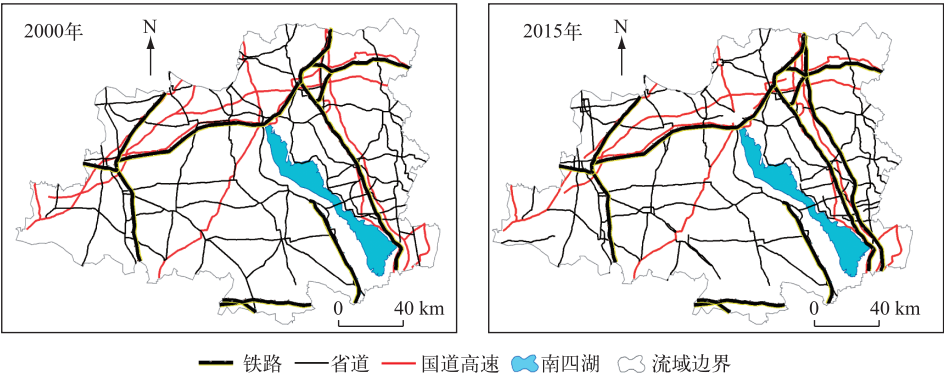


图 2 南四湖流域 2000 和 2015 年交通系统图

Fig.2 Traffic maps of Lake Nansi Basin in 2000 and 2015

3.2 流域生境质量变化

1980、2000 和 2015 年南四湖流域平均生境质量分别为 0.28、0.21 和 0.19, 35 a 下降幅度达 30.6%, 生态环境持续恶化. 空间尺度上, 流域生境质量呈现出西部平原(0.19) < 东部丘陵山区(0.44) < 南四湖自然保护区(0.81) 的特点, 主要原因在于西部平原区作为农业种植区, 密集的农业活动造成了严重的面源污染. 同时, 城市扩张、工业发展和人口聚集造成了生境破碎、退化甚至消失, 从而导致区域生境质量下降; 东部丘陵山区由于海拔较高和地势相对崎岖, 且部分地区设立了森林保护区, 人类活动干扰相对小, 生境质量优于平原地区; 南四湖湖区自 1990s 建立自然保护区以来, 生态环境受到长期有效的保护, 所以生境质量最高.

运用 ArcMAP 10.2 将生境质量图栅格相减得到生境质量变化图. 35 a 间绝大部分区域生境质量下降, 而生境质量上升的区域主要分布于南四湖自然保护区和东部丘陵地带(图 3d~e). 西部平原地区由于城市、工业的迅猛发展和活跃的农业活动, 生境质量下降最为明显. 南四湖自然保护区生境质量在 1980—2000 和 2000—2015 年都升高, 生态保护成效显著. 流域东部丘陵山区的人类活动相对较小, 并且这一区域曲阜市孔子湖国家湿地公园、邹城太平国家湿地公园、泗河源国家湿地公园等生态保护区的先后建立, 使生境得以保护, 生境质量升高.

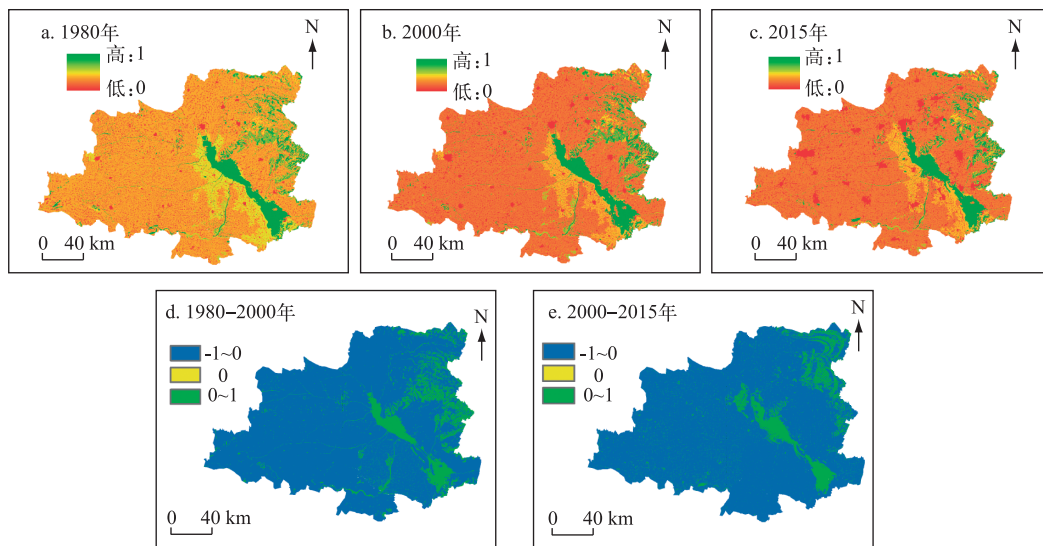


图 3 南四湖流域 1980—2015 生境质量(a~c) 及其变化(d~e)

Fig.3 Habitat quality (a~c) and changes (d~e) between 1980 and 2015 in Lake Nansi Basin

3.3 生境质量分布特征及优先保护区

南四湖流域当前(2015 年)生境质量总体水平较低, 其中, 南四湖自然保护区和东部丘陵山区生境质量相对较高; 县域生境质量分级图(图 4b)显示, 生境质量空间分布呈现西部低、东部高的特点; 流域大部分县生境处于 0.10~0.20 之间, 生境质量处于 0.50~0.70 之间的县仅有微山县和山亭区两地. 当前生境稀有度分布图(图 4c)显示, 生境稀有度指数较高的区域主要是南四湖湖区和流域东部丘陵山区, 这 2 个区域生境保存完整性较高, 但同时部分湖区生境稀有度指数却极低, 主要原因在于渔业养殖等人类活动的剧烈干扰, 导致湖泊边缘水域大量转化为水库坑塘.

按照生境质量较高且生境保存完整性好(即生境稀有度指数较高)这 2 个原则来选择生物多样性的优先保护区, 南四湖湖区主体生境质量和稀有度最高, 目前已经划定为省级自然保护区, 但生境稀有度指数显示湖区周围干扰强烈, 故还应加强湖区周围缓冲区的保护; 此外, 东部丘陵山区也需要进行生物多样性的优先保护, 目前这一区域已经设立孔子湖国家湿地公园、泗河源国家湿地公园等生态保护区.

3.4 生态保护措施情景下流域生境质量的变化

近 35 a 土地利用变化表明, 湖区渔业活动和围垦严重, 威胁湖泊生境; 此外, 湖东丘陵地区农业活动加

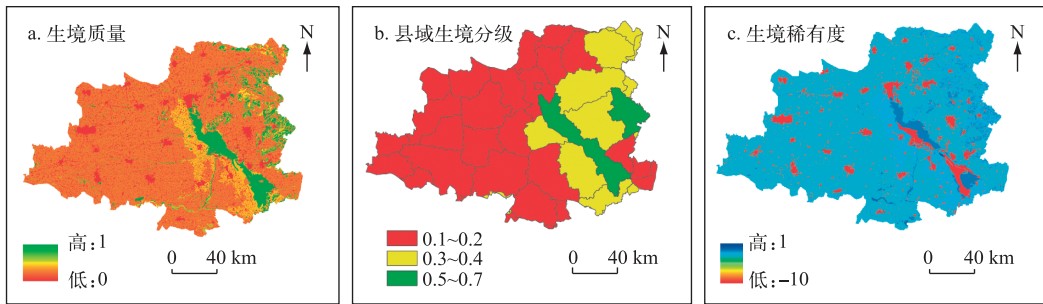


图 4 南四湖流域当前(2015 年)生境质量(a~b)及生境稀有度(c)
Fig.4 Habitat quality (a~b) and habitat rarity (c) in 2015 in Lake Nansi Basin

刷了湖泊的面源污染,同样会威胁湖区生境. 因此,有针对性地采取湖区退耕还湿还林和丘陵山区退耕还林这 2 种措施可以提高生境质量、保护生物多样性. 湖区退耕还湿还林(图 5b)是将南四湖自然保护区内的旱地转为林地、水田转为湿地,山区退耕还林(图 5c)则是将湖东山地丘陵地区坡度大于 25° 的丘陵旱地全部转为林地. 运用 InVEST 模型模拟两种保护政策情景对流域生境质量的提升效果,结果显示如图 5 和表 4.

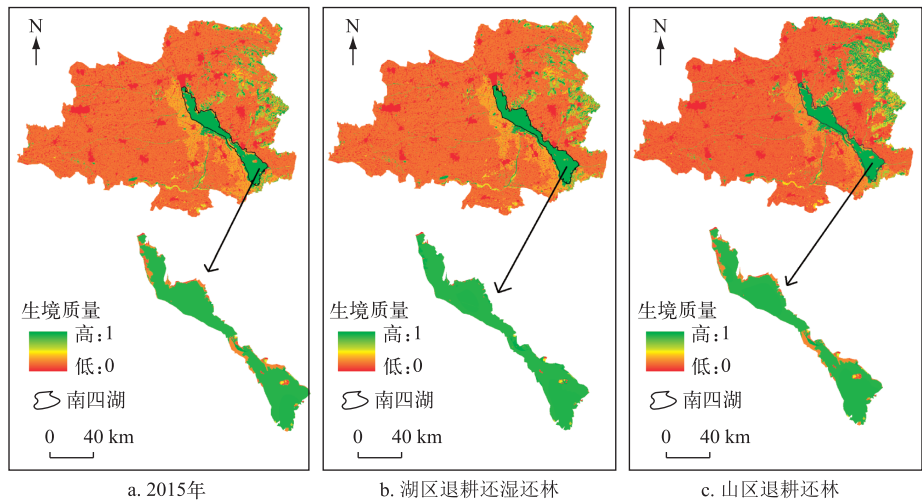


图 5 不同情景下生境质量状况
Fig.5 The status of habitat quality under different scenarios

表 4 不同情景下生境质量变化
Tab.4 Variation of habitat quality under different scenarios

	当前情景	湖区退耕还林还湿	山区退耕还林
全流域	0.19	0.20	0.23
南四湖自然保护区	0.81	0.88	0.81

模拟结果显示,湖区退耕还湿还林情景,南四湖自然保护区内生境质量显著提高(图 5b、表 4),平均生境质量指数提高 9.21%;山区退耕还林情景下,全流域平均生境质量提高 16.75%(图 5c、表 4),但是湖区生境质量提高并不明显,仅提高 0.14%. 李爽等^[29]对南四湖流域非点源氮磷污染的研究表明,湖东丘陵地区的泥沙、氮磷负荷贡献率高,退耕还林应能显著减少农业活动的干扰,提高湖区生境质量. 政策模拟,但实际上

山区退耕还林情景对湖区改善结果不明显,其原因在于 InVEST-Habitat Quality 模型自身局限,虽能较好地模拟陆地生境,但对水生生境的模拟效果相对较差^[17].

4 结论

南四湖流域土地利用类型主要以耕地为主,属于典型的农业流域. 1980—2015 年间流域耕地、林地、草地大幅减少,但是建设用地大幅增加. InVEST-Habitat Quality 模型模拟表明,流域整体生境质量处于较低水平,且 35 a 间呈逐渐降低趋势. 流域大部分地区生境处于最低级别(0~0.20)并且多位于西部平原区,东部丘陵地区生境优于平原地区,湖区生境质量最高. 近 35 a 来生境保存完整性(即生境稀有度指数)较高的区域主要是湖区主体和流域东部丘陵山区. 部分边缘湖区由于受到沿湖渔业养殖和农业生产等人类活动的剧烈干扰,生境稀有度指数却极低,需要优先考虑保护.

InVEST-Habitat Quality 模型模拟湖区退耕还林还湿和流域丘陵旱地退耕还林 2 种政策情景对生境质量的改善效果,结果表明 2 种生态环境保护政策都可以显著提升流域生境质量. 但是,湖区退耕还湿还林能显著改善湖区生境;丘陵旱地退耕还林可以显著提升流域总体生境质量,但对湖区影响却很小. 丘陵旱地退耕还林可以显著减少入湖泥沙、氮磷负荷,从而保护湖泊水体环境和提高水生生境. 模型模拟效果不明显,主要原因在于 InVEST-Habitat Quality 模型更擅长模拟陆地生境,在水生生境模拟上存在一定局限.

5 参考文献

- [1] Hall LS, Krausman PR, Morrison BL. TheHabitat concept and a plea for standard terminology. *Wildlife Society Bulletin*, 1997, **25**(1): 173-182.
- [2] Otto CRV, Roth CL, Carlson BL. Land-use change reduces habitat suitability for supporting managed honey bee colonies in the Northern Great Plains. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(37): 10430-10435.
- [3] Nejadi A, Jafari HR, Makhdom MF. Modeling Plausible Impacts of land use change on wildlife habitats, application and validation; Lisar protected area, Iran. *International Journal of Environmental Research*, 2012, **6**(4): 883-892.
- [4] Ellis EC, Goldewijk KK, Siebert S. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, **19**(5): 589-606.
- [5] Lohse KA, Newburn DA, Opperman JJ. Forecasting relative impacts of land use on anadromous fish habitat to guide conservation planning. *Ecological Applications*, 2008, **18**(2): 467-482.
- [6] Wu W, Zhang M, Xu LP. The impact of land use change on habitat network: A case study of *Egretta garzetta* in Su-Xi-Chang Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **14**: 4897-4906. [吴未, 张敏, 许丽萍. 土地利用变化对生境网络的影响——以苏锡常地区白鹭为例. 生态学报, 2015, **14**: 4897-4906.]
- [7] Tang XG, Li HP, Xu XB. Changing land use and its impact on the habitat suitability for wintering Anseriformes in China's Poyang Lake region. *Science of the Total Environment*, 2016, **557**: 296-306.
- [8] Chen LD, Liu XH, Fu BJ *et al.* Evaluation on giant panda habitat fragmentation in Wolong Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(3): 291-297. [陈利顶, 刘雪华, 傅伯杰等. 卧龙自然保护区大熊猫生境破碎化研究. 生态学报, 1999, **19**(3): 291-297.]
- [9] Ouyang ZY, Liu JG, Xiao H *et al.* An assessment of giant panda habitat in Wolong Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(11): 1869-1874. [欧阳志云, 刘建国, 肖寒等. 卧龙自然保护区大熊猫生境评价. 生态学报, 2001, **21**(11): 1869-1874.]
- [10] Wu JS, Cao QW, Shi SQ *et al.* Spatio-temporal variability of habitat quality in Beijing-Tianjin-Hebei Area based on land use change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(11): 3457-3466. [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. 应用生态学报, 2015, **26**(11): 3457-3466.]
- [11] Duarte GT, Ribeiro MC, Paglia AP. Ecosystem services modeling as a tool for defining priority areas for conservation. *Plos ONE*, 2016, **11**(5).
- [12] Liao Y, Wang XY, Zhou JM. Suitability assessment and validation of Giant Panda habitat based on geographical detector. *Journal of Geo-information Science*, 2016, **18**(6): 767-778. [廖颖, 王心源, 周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境

- 适宜度评价模型及验证. 地球信息科学学报, 2016, **18**(6): 767-778.]
- [13] Lerman SB, Nislow KH, Nowak DJ *et al.* Using urban forest assessment tools to model bird habitat potential. *Landscape and Urban Planning*, 2014, **122**: 29-40.
- [14] Yang Y, Wei HY, Wang D *et al.* Comparison of the prediction models of potential geographical distribution of Forsythia suspense. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(9): 2562-2568. [杨洋, 卫海燕, 王丹等. 连翘潜在地理分布预测模型比较. 生态学杂志, 2016, **35**(9): 2562-2568.]
- [15] Liu ZS, Gao H, Teng LW *et al.* Habitat suitability assessment of blue sheep in Helan Mountain based on MAXENT modeling. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(22): 7243-7249. [刘振生, 高惠, 滕丽微等. 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价. 生态学报, 2013, **33**(22): 7243-7249.]
- [16] Sharp R. InVEST VERSION User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2016.
- [17] Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B *et al.* Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the Total Environment*, 2016, **540**: 63-70.
- [18] Leh MDK, Matlock MD, Cummings EC *et al.* Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, **165**(1751): 6-18.
- [19] Bao YB, Liu K, Li T *et al.* Effects of land use change on habitat based on InVEST Model-Taking Yellow River Wetland Nature Reserve in Shanxi Province as an example. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(3): 622-629. [包玉斌, 刘康, 李婷. 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. 干旱区研究, 2015, **32**(3): 622-629.]
- [20] Chen J, Li R, Tang Y *et al.* Comparison of land use patterns in Xiliang Lake in 1990 and 2010. *Wetland Science*, 2014, (1): 113-116. [陈佳, 黎如, 唐瑶等. 1990 年与 2010 年西凉湖区土地利用格局对比研究. 湿地科学, 2014, (1): 113-116.]
- [21] Zhang XS, Hao FH, Yang ZF *et al.* Runoff and sediment yield modeling in Meso-scale Watershed Based on SWAT Model. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, **10**(4): 38-42. [张雪松, 郝芳华, 杨志峰等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究. 水土保持研究, 2003, **10**(4): 38-42.]
- [22] Yu QZ, Zhang ZL, Lu JS. Spatial and temporal variation of vegetation carbon storage in Nansihu lake wetland from 1987 to 2008. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(9): 1527-1532. [于泉洲, 张祖陆, 吕建树. 1987—2008 年南四湖湿地植被碳储量时空变化特征. 生态环境学报, 2012, **21**(9): 1527-1532.]
- [23] Yu QZ, Zhang ZL, Yuan Y. Preliminary study in wetland vegetation and its carbon storage of Nansihu Lake in shandong province. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2010, **22**(5): 88-93. [于泉洲, 张祖陆, 袁怡. 山东省南四湖湿地植被碳储量初步研究. 云南地理环境研究, 2010, **22**(5): 88-93.]
- [24] Zang SY, Huang X, Zheng SF. Landscape processing response analysis on landuse development trend of natural resources based city: A case study in Daqing city. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(7): 1699-1706. [臧淑英, 黄樨, 郑树峰. 资源型城市土地利用变化的景观过程响应——以黑龙江省大庆市为例. 生态学报, 2005, **25**(7): 1699-1706.]
- [25] Shi PJ, Chen J, Pan YZ. Landuse change mechanism in Shenzhen City. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(2): 151-160. [史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析. 地理学报, 2000, **55**(2): 151-160.]
- [26] Highway Department of Shandong Provincial Communications Bureau. Preliminary summarization of technical transformation of trunk highway in Shandong Province. *Highway*, 1980, (3): 6-9. [山东省交通局公路处. 山东省干线公路技术改造的初步总结. 公路, 1980, (3): 6-9.]
- [27] Xie GD, Zhen L, Lu CX *et al.* Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources*, 2008, **23**(5): 911-919. [谢高地, 甄霖, 鲁春霞等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, **23**(5): 911-919.]
- [28] Sun XZ, Zhou HL, Xie GD. Ecological services and their values of Chinese agroecosystem. *China Population, Resources and Environment*, 2007, **17**(4): 55-60. [孙新章, 周海林, 谢高地. 中国农田生态系统的服务功能及其经济价值. 中国人口·资源与环境, 2007, **17**(4): 55-60.]
- [29] Li S, Zhang ZL, Sun YY. Simulation of non-point source pollution of nitrogen and phosphorus in Lake Nansi watershed using SWAT model. *J Lake Sci*, 2013, **25**(2): 236-242. DOI:10.18307/2013.0209. [李爽, 张祖陆, 孙媛媛. 基于 SWAT 模型的南四湖流域非点源氮磷污染模拟. 湖泊科学, 2013, **25**(2): 236-242.]