南太行城镇群绿色空间时空演变与驱动因素分析*

李诗尧 李 翅

北京林业大学园林学院 北京 100083

摘要：探究绿色空间演变与驱动因素对于城镇群跨区域协同发展具有重要意义。以南太行城镇群为例，基于2000、2010、2020年土地利用和社会经济统计数据，采用动态度、转移矩阵、景观格局指数分析各类绿色空间的演变规律，通过皮尔森相关性和参数最优地理探测器分析驱动机制。结果表明：1）2000—2020年，南太行城镇群绿色空间面积呈下降趋势，耕地和草地面积持续减少，耕地大量转为建设用地；2）多数绿色空间的景观格局指数呈下降趋势；3）绿色空间面积指标与社会经济和自然环境指标相关性显著，地形因子解释力最高。综上可知，近20年各类绿地斑块数量降低、破碎度增加，景观连接性降低；城乡建设发展和自然环境条件是影响绿色空间演变的重要因素，地形地貌是山地城镇群绿色空间演变的直接驱动力。

关键词：绿色空间；时空演变；景观格局；参数最优地理探测器；南太行城镇群

DOI：10.12169/zgcsly.2024.05.22.0001

Spatio-temporal Evolution and Driving Factors of Green Space in the Town Agglomeration of the South Taihang Mountain

Li Shiyao Li Chi

(School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the spatio-temporal evolution and driving factors of green spaces is of great significance for coordinated trans-regional development of a town agglomeration. The research takes the town agglomerations of the south Taihang Mountain as the example and land use data and socioeconomic statistics in 2000, 2010, and 2020 to analyze the evolution regularity using dynamic degree, transfer matrix, landscape pattern indices as well as the driving mechanism using Pearson correlation coefficient and Optimal Parameters-Based Geographical Detector. The results show that: 1) From 2000 to 2020, the area of green spaces showed a decreasing trend, and the area of cropland and grassland continued to decline, and cropland had been transferred to construction land; 2) The landscape pattern index of the most green spaces presented a decreasing trend; and 3) Green space area indicators were significantly correlated with social economy and natural environment indicators, and the terrain factor was the most capable of explanation. In conclusion, various types of green space patches have decreased in number, the fragmentation degree increased, and the landscape connectivity decreased in the past two decades, and urban and rural construction and natural environment conditions are the important factors affecting the evolution of green spaces, while topography is the direct driving force to the evolution of green space in mountains town agglomerations.

Keywords: green space; spatiotemporal evolution; landscape pattern; Optimal Parameters-Based Geographical Detector; town agglomeration of the south Taihang Mountain

收稿日期：2024-05-22

* 基金项目：国家自然科学基金面上项目（51978050）

第一作者：李诗尧（1996-），女，博士生，研究方向为城乡人居生态环境。E-mail：lsybjfu@foxmail.com

通信作者：李翅（1971-），男，博士，教授，研究方向为韧性城市与区域空间发展、国土空间规划与城市设计、绿色社区与低影响开发。E-mail：lichi@bjfu.edu.cn

快速的城镇化发展带来了城市无序扩张、绿色空间破碎、生态系统失衡等诸多矛盾，绿色空间成为优化城乡生态环境与可持续发展的重要基础[1-3]。绿色空间包含各类自然与人工的耕地、林地、草地及水域，其形态与类型在区域范围内的组合分布即为绿色空间格局[4-5]。近年来，绿色空间的时空变化成为优化城镇区域蓝绿空间体系的关键依据，土地利用演变成为城镇研究单元下影响绿色空间分布和景观格局变化的基础[2,4]。

目前，绿色空间的时空演变研究主要为演变规律与驱动机制两大内容[1,4]。在演变规律方面，研究方式包括结合史料年鉴的定性描述分析，与基于土地利用数据的空间量化分析[4,6]；研究内容包括数量分析、空间分布与景观结构分析[3-4,6-7]；研究方法包括计算动态度、土地利用转移矩阵、景观指数计算等[4,7-9]。在驱动机制方面，驱动因子的选择包括自然环境和社会经济因素[1-2,4-5,8]；分析方法采用最小二乘法、皮尔森相关系数、地理探测器探究因子的相关性与交互作用[3,10-12]，或运用莫兰指数、冷热点分析、地理加权回归等方法测度其空间效应[2,5,11-12]。已有绿色空间演变研究主要集中于平原城市群或经济发达地区，对于山地城镇群的研究相对较少[4,6-8]。因此，完整环境单元与动态性分析成为山地区域绿色空间的主要研究内容[13]。

太行山绵延 400 km 左右，是具有国家文化标识性意义的重要山脉，也是中华民族精神重要传承地和太行精神重要发祥地[14]。2020 年国家发改委、文旅部联合公布《太行山旅游业发展规划（2020—2035 年）》，立足太行山周边城市群崛起的发展背景，以北京、河北、山西、河南 4 省（市）78 个县（市、区）为规划范围，为统筹太行山区地理空间边界与兼顾跨区域协调发展提出了空间布局思路。其中，南太行地跨山西、河南两省，山势雄壮，峡谷众多，地域特征鲜明，因其独特的地质地貌成为我国中部地区重要的生态屏障与黄河流域生态保护区的重要组成部分[15]，在太行山规划中居于引领带动作用，作为特定的地理单元具有重要的研究价值。

近 20 年南太行快速的城镇化发展带来了土壤侵蚀、地貌景观碎片化、植被退化等生态环境问题[14]，生态保护与产业发展的矛盾制约了当地经济社会的可持续发展[16]。党的十八大以来，南太行城镇群迎来生态文明和绿色发展的规划建设机遇，河南省在多地市推动和验收山水林田湖草生态保护修复工程，山西省强化太行一号旅游公路沿线生态建设，两省联合推动国家公园创建与自然保护地提档升级。目前，已有研究对南太行绿色空间时空演变的研究数量较少，也缺少对城镇群整体的区域性研究。如何破除区域壁垒、统筹区域生态修复与经济发展成为南太行城镇群跨区域绿色协同发展亟需应对的问题。

基于上述认识，本文选取 2000、2010、2020 年作为时间节点，分析绿色空间类型转移与景观格局指数变化，探究绿色空间演变的驱动机制。本研究厘清南太行城镇群绿色空间演变规律，突破传统行政边界分隔，为优化绿色空间格局和打造生态共同体提供理论参考。

1　研究区概况

依据《太行山旅游业发展规划（2020—2035 年）》，研究范围包含南太行山区（111°34′—114°27′E，34°32′—37°4′N）28 个县（市、区）（图 1）。研究区椭球面积 31 227.49 km^2，属南温带气候区，地形条件复杂，土壤类型以砂土为主，东南区域地形整体平缓，沿两省交界处地形起伏变化较大。近 20 年来，南太行城镇群城镇化进程剧烈，经济增速较快。

2　研究方法

2.1　数据来源

研究数据年份选择 2000、2010、2020 年，以县（市、区）为单元进行分区统计。行政边界来自 BIGEMAP 与中国科学院资源环境科学与数据中心。土地利用数据源自中国科学院资源环境科学与数据中心，依据二级分类系统将 23 类土地资源分为绿色空间（耕地、林地、草地、水域）和非绿色空间（建设用地和未利用土地），空间分辨率 30 m。高程数据源自地理空间数据云，空间分辨率 30 m。土壤和气候数据源自中国科学院资源环境科学与数据中心，空间分辨率 1 km。人口、地区生产总值等社会经济数据源自 EPS DATA、

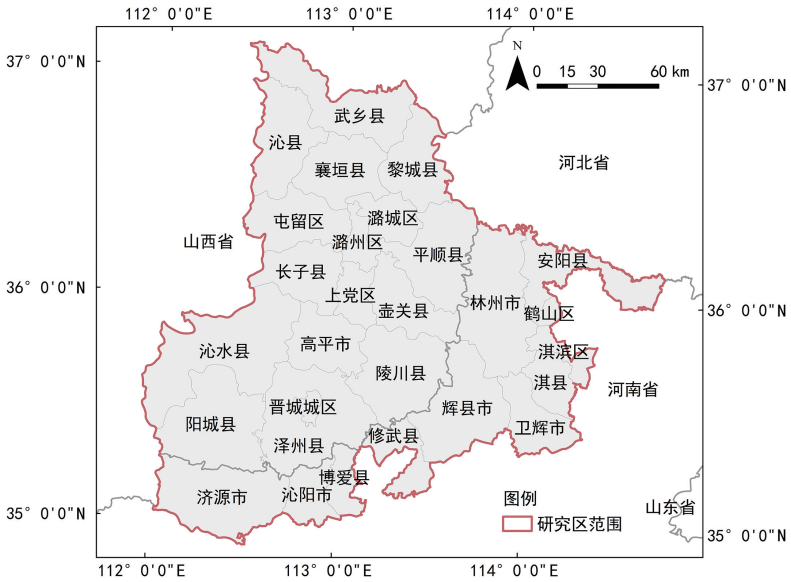


图 1 研究区域

各地国民经济和社会发展统计公报与中国县域统计年鉴。

2.2 动态度计算

通过动态度反映各类绿色空间的变化速率[8,10]，计算公式为：

$$K = \frac{S_{ib} - S_{ia}}{S_{ia}} \times \frac{1}{T} \quad (1)$$

式（1）中：S_{ia}和S_{ib}分别为 i 类绿色空间在研究时间段起点与终点的面积；T 为研究时间段间隔年份；K 为该类绿色空间类型在研究时段内的变化速率。各县（市、区）的绿色空间动态度基于自然断点法划分为 4 类。

2.3 空间转移矩阵

通过转移矩阵反映研究时段内各类用地相互转化的动态情况[3,10]，计算公式为：

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ & & \vdots & \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式（2）中：S_{ij}为研究初期到末期时间段内 i 类向 j 类空间转移的面积矩阵；n 为绿色空间类型数量。

2.4 景观格局指数计算

参考既有研究经验[4,7,9,17]，选取斑块面积比（PLAND）、斑块个数（NP）、斑块密度（PD）、最大斑块指数（LPI）、边缘密度（ED）、景观形状指数（LSI）、连通性（CONNECT）、聚合度指数（AI）8 项指数，运用 Fragstats 4.2 软件计算。

2.5 相关性分析

地形、气候、人口数量、GDP 等因素会对绿色空间和生境格局产生影响[10,18]，因此驱动因素常常归纳为自然环境和社会经济类别[2]。基于面板数据的可获得性与既有研究经验[2,4-5,7-8,11,19]，以县（市、区）为统计分析单元，自变量为城乡社会经济与自然环境共 16 项驱动因素（X1 ~ X16），因变量为各类绿色空间面积（Y1 ~ Y5）（表 1）。

表 1 自变量与因变量情况描述

分类		编号	名称
自变量	城乡社会经济	X1	年末总人口/万人
		X2	城镇化率
		X3	城乡建成区人口密度/万人·$(km^2)^{-1}$
		X4	地区生产总值/亿元
		X5	第一产业增加值/亿元
		X6	第二产业增加值/亿元
		X7	第三产业增加值/亿元
		X8	全社会固定资产投资/亿元
	城乡自然环境	X9	人均绿地面积/km^2·万人$^{-1}$
		X10	山地面积/km^2
		X11	年平均相对湿度/%
		X12	年降水量/mm
		X13	年平均地温/℃
		X14	砂土百分比/%
		X15	粉砂土百分比/%
		X16	黏土百分比/%
因变量	各类绿色空间面积	Y1	耕地面积/ km^2
		Y2	林地面积/km^2
		Y3	草地面积/km^2
		Y4	水域面积/km^2
		Y5	绿色空间面积/km^2

运用 SPSS20 皮尔森相关系数开展双变量相关性分析，VIF<10 表明自变量因子间没有严重的多重共线性，分析结果能反映两个变量之间的线性相关程度；*P* 值小于 0.05 表明两个因子存在显著相关。

2.6　参数最优地理探测器

参数最优地理探测器（Optimal Parameters-based Geographical Detector，OPGD）是基于地理探测器模型的改进模型。借助 R 语言中的 GD 包，在间断数量设定范围内计算各个解释变量的 q 值，用 q 值评估解释变量的相对显著性。选择 q 值最大的离散化方法和断点数即为各变量最优参数，从而尽可能提高变量空间分层的异质性[12,18-19]。本研究设定间断数量为 3~6 类，通过因子探测得出单一因素的解释水平，通过交互探测得出两个空间解释变量的相互影响[19]。

3　结果与分析

3.1　绿色空间演变规律

3.1.1　南太行城镇群绿色空间面积演变

南太行城镇群以耕地和林地为主要绿色空间类型（图 2~3、表 2~3）。近 20 年绿色空间总面积呈降低趋势，减少了 956.42 km^2，年动态度为-0.16%。耕地面积降低了 894.65 km^2，年动态度从-0.12%增至-0.50%。林地面积先减少后增加，总面积增加 123.66 km^2。水域面积先增加后减少，但总面积少量增加 41.53 km^2。2000—2010 年，耕地、林地、草地面积均有所下降。耕地面积下降最大，共降低 174.17 km^2，水域面积有所增加，年动态度较高，为 1.99%。各县（市、区）耕地、林地和草地变化动态度总体相近，晋城城区和淇滨区耕地与绿地总面积减少幅度较大，辉县市林地增加幅度较大，襄垣县和长子县草地增加幅度较大，晋城城区水域面积增加较大。2010—2020 年，耕地、草地、水域面积均呈下降趋势，绿色空间共下降 824.65 km^2，年均变化动态度增至-0.28%。其中，耕地面积转换幅度最大，林地面积明显增加。各县（市、区）绿色空间变化动态度呈现分布差异，东北组团林地增加幅度较大，沿两省交界的峡谷断崖地带草地减少幅度较大，大多数县（市、区）水域呈增加趋势。

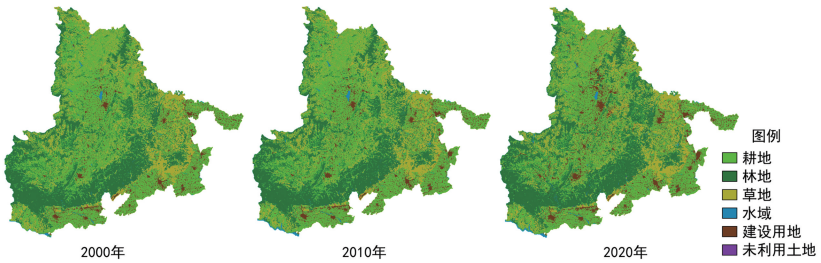


图 2　南太行城镇群 2000、2010、2020 年土地覆盖

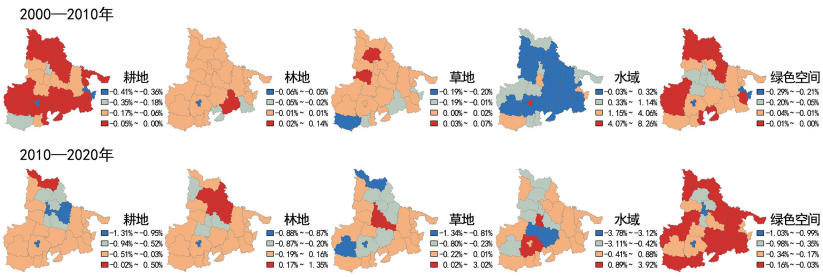


图 3　各县（市、区）绿色空间变化动态度

表 2　各类用地面积变化统计

用地类型		2000 年		2010 年		2020 年	
		椭球面积/km^2	百分比/%	椭球面积/km^2	百分比/%	椭球面积/km^2	百分比/%
绿色空间	耕地	14 678.11	46.93	14 503.95	46.37	13 783.46	44.07
	林地	8 941.46	28.59	8 937.87	28.58	9 065.12	28.98
	草地	5 711.00	18.26	5 703.13	18.23	5 484.04	17.53
	水域	270.26	0.86	324.11	1.04	311.79	1.00
	总计	29 600.83	94.64	29 469.06	94.22	28 644.41	91.58
非绿色空间		1 676.65	5.36	1 808.42	5.78	2 633.07	8.42
总计		31 277.49	100.00	31 277.49	100.00	31 277.49	100.00

表 3 绿色空间变化动态度

用地类型		2000—2010 年		2010—2020 年		2000—2020 年	
		面积变化/km²	动态度/%	面积变化/km²	动态度/%	面积变化/km²	动态度/%
绿色空间	耕地	-174.17	-0.12	-720.49	-0.50	-894.65	-0.30
	林地	-3.58	0.00	127.24	0.14	123.66	0.07
	草地	-7.87	-0.01	-219.08	-0.38	-226.96	-0.20
	水域	53.85	1.99	-12.32	-0.38	41.53	0.77
	总计	-131.77	-0.04	-824.65	-0.28	-956.42	-0.16

3.1.2 南太行城镇群绿色空间转移分析

由表 4~5、图 4~5 可知，近 20 年间主要用地转换发生在耕地和建设用地之间。2000—2010 年，耕地转出面积最大，主要转出为建设用地，范围集中在城镇群北部区域；其次是草地转出面积较多，转出区域零散分布；非绿色空间主要转出类型为耕地，转出区域呈中部组团分布和南部带状分布。2010—2020 年，各类绿色空间转出面积较上一时段显著增加；耕地转出面积较多，主要转为建设用地，转出区域集中在中部城市组团。

表 4 2000—2010 年土地利用转移矩阵 km²

时间	用地类别		2010 年						面积变化
			绿色空间				非绿色空间		
			耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地	
2000 年	绿色空间	耕地	—	4.844 7	6.224 1	39.315 0	131.040 6	0.001 4	181.425 8
		林地	0.453 4	—	0.811 5	5.254 9	2.596 7	0.000 1	9.116 6
		草地	0.656 3	0.407 5	—	12.801 2	2.476 7	0.000 0	16.341 7
		水域	2.359 2	0.211 3	1.140 1	—	0.364 6	0.000 0	4.075 1
	非绿色空间	建设用地	3.778 8	0.067 9	0.079 9	0.557 1	—	0.001 0	4.484 6
		未利用土地	0.013 1	0.001 2	0.211 4	0.000 0	0.001 2	—	0.226 9

表 5 2010—2020 年土地利用转移矩阵 km²

时间	用地类别		2020 年						面积变化
			绿色空间				非绿色空间		
			耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地	
2010 年	绿色空间	耕地	—	172.034 6	221.410 2	23.204 4	819.670 2	3.565 1	1 239.884 6
		林地	110.418 3	—	142.793 3	8.365 0	57.144 5	0.376 2	319.097 3
		草地	243.600 3	265.780 2	—	5.694 4	74.328 3	3.086 6	592.489 9
		水域	29.457 8	5.386 5	2.827 4	—	12.490 3	0.063 0	50.225 1
	非绿色空间	建设用地	135.895 3	2.927 8	6.169 6	0.638 6	—	0.150 0	145.781 3
		未利用土地	0.026 6	0.212 1	0.207 0		0.230 4	—	0.676 2

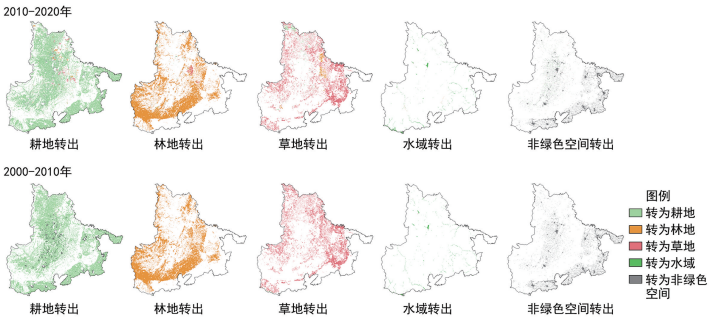


图 4 2010—2020 年绿色空间转移分布

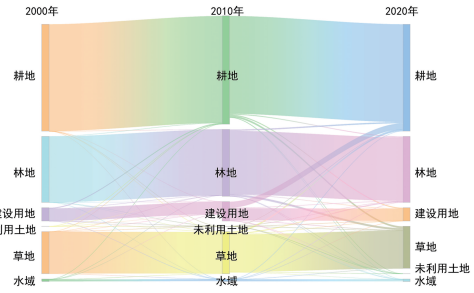


图 5 2010—2020 年绿色空间转移桑基图

3.1.3 南太行城镇群绿色空间景观格局指数变化

由图 6 可知，2000—2020 年，耕地的斑块面积比（PLAND）、最大斑块指数（LPI）、聚合度指数（AI）、连通性（CONNECT）等呈下降趋势，边缘密度（ED）较为平稳，斑块个数（NP）和斑块密度（PD）先上升后下降，表明耕地斑块总面积降低，分布破碎分散，边界形态趋于稳定，连通性有所下降，景观优势程度显著降低。林地 PLAND 和 AI 上升，其余指数均为降低，表明林地斑块景观优势程度和集聚性有所增加，景观连接性有所降低，斑块破碎化程度增加。草地除 AI 以外的指数均为降低，表明草地斑块聚集程度增

加，斑块景观连接性轻微降低。水域斑块的 NP、PD、LSI 等指数有所降低，LPI、ED 变化平稳，表明水域斑块逐渐集中整合，连接性降低，聚合程度有所增加。

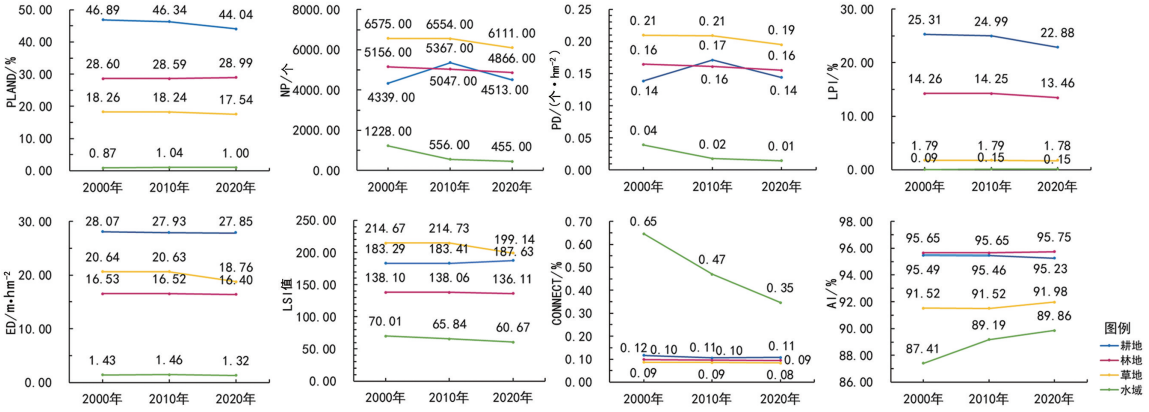


图 6　景观格局指数变化图

3.2　绿色空间演变的驱动机制

3.2.1　相关性分析

由表 6 可知，2000—2020 年，社会经济和自然环境要素（X1～X16）与绿色空间面积（Y1～Y5）存在相关性。耕地和水域面积主要与社会经济相关，草地和绿色空间总面积与自然环境相关。耕地面积与年末总人口、城乡建成区人口密度等因素相关，反映了城镇扩张对耕地保护的压力。林地面积与山地面积、年降水量、年平均地温相关，反映了林地保育受到当地地形气候的影响。草地面积与山地面积和土壤类型占比相关，表明草地植物生长受到地理条件的制约。水域面积与多个社会经济因素相关，反映了经济增长带动水利系统发展。分析结果与研究区实际情况相符合。

表 6　因子相关性分析

项目		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16
Y1	相关性	0.279*	−0.539**	−0.222*	0.080	0.220*	0.175	−0.073	−0.023	0.068	0.467**	−0.102	0.069	−0.252*	−0.024	0.185	−0.077
	显著性(双侧)	0.010	0.000	0.043	0.470	0.044	0.112	0.508	0.833	0.541	0.000	0.356	0.530	0.021	0.828	0.092	0.484
Y2	相关性	−0.107	−0.278*	0.025	0.005	−0.074	0.090	−0.092	−0.132	−0.045	0.978**	−0.031	0.572**	−0.306**	0.172	−0.004	−0.192
	显著性(双侧)	0.332	0.010	0.819	0.964	0.506	0.417	0.406	0.231	0.683	0.000	0.778	0.000	0.005	0.118	0.969	0.081
Y3	相关性	0.161	−0.307**	−0.006	0.054	0.103	0.109	−0.033	−0.048	−0.068	0.486**	−0.078	0.108	−0.242*	0.360**	−0.215*	−0.285**
	显著性(双侧)	0.144	0.004	0.960	0.628	0.350	0.326	0.767	0.662	0.538	0.000	0.479	0.327	0.027	0.001	0.050	0.009
Y4	相关性	0.471**	−0.055	0.298**	0.537**	0.375**	0.578**	0.390**	0.319**	−0.052	0.149	−0.059	0.009	0.239*	−0.016	−0.060	0.052
	显著性(双侧)	0.000	0.618	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.642	0.176	0.593	0.935	0.028	0.883	0.589	0.637
Y5	相关性	0.104	−0.454**	−0.066	0.061	0.081	0.162	−0.081	−0.090	−0.021	0.875**	−0.081	0.381**	−0.334**	0.192	0.005	−0.219*
	显著性(双侧)	0.347	0.000	0.554	0.581	0.462	0.141	0.465	0.413	0.853	0.000	0.465	0.000	0.002	0.080	0.967	0.045

注：** 表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关；* 表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关。

3.2.2　地理探测器分析

因子探测结果（图 7）表明，绿色空间总体受城镇化水平、地形和土壤条件驱动，地形因子解释力最高；其次是城镇化率、人均绿地面积、黏土百分比具有一定解释力。其中，耕地面积主要受城镇化水平、地形和土壤条件驱动，驱动因子的解释力水平相近；林地主要受地形驱动，q 值为 0.95；草地主要受地形驱动，q 值为 0.73，同时城镇化水平和土壤条件也具有一定解释力；水域受地形和城乡经济发展驱动，多个经济发展指标均具有较强的解释力。

交互探测结果（图 8）表明，驱动因子两两交互类型主要为双变量增强和非线性增强，共同作用效果大于独立解释效果。其中，耕地的自然环境因素之间交互效果增强，山地面积与砂土百分比为非线性增强（0.850 2）；林地草地的社会经济与自然环境因素之间解释效果增强；草地的年末总人口与山地面积为双变量增强（0.891 3）；水域出现了非线性减弱与单因子非线性减弱，表明水域面积更多受到单一因素的影响。绿色空间总体受到社会经济与自然环境因子共同驱动，但地形因子更加适合独立解释。

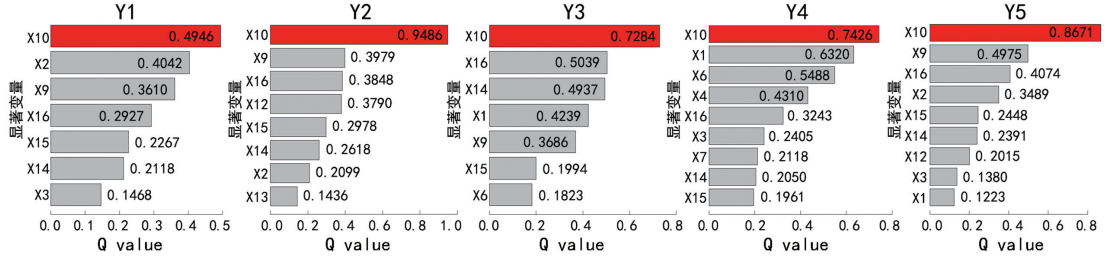


图 7 因子探测结果

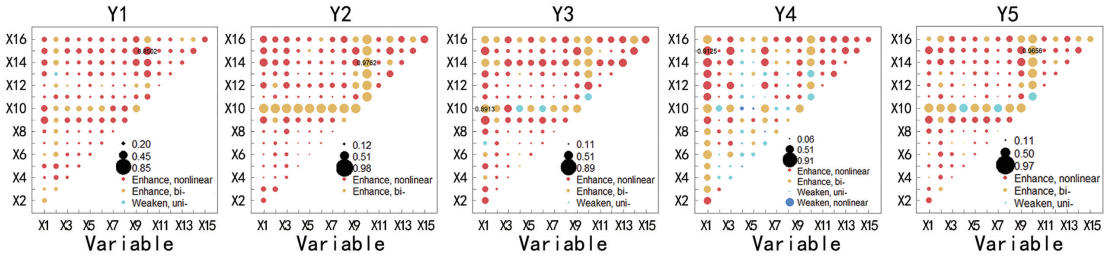


图 8 交互探测结果

4 讨论

4.1 南太行城镇群绿色空间演变规律与优化建议

近年来，绿色空间演变始终是统筹城乡发展中人与自然关系的研究热点。经历我国城镇化快速发展时期，在流域[4-5]、核心城市群[19]、省域[8]、大城市中心城区[20]等地的研究中，绿色空间的规模总量均不同程度的下降，社会经济因素具有较强的影响作用，自然和社会因素交互解释力有所增强，这些结论已得到证实。本文以南太行城镇群作为研究对象，通过关注绿色空间演变的山-城关系发现，绿色空间转换围绕山脉地形和中心城镇形成鲜明的带状与组团分布特征，地形地貌因素具有较强影响力，为山地绿色空间研究提供了案例参照。

基于分析结果，依托两省国土空间规划与生态修复工程的政策实施背景，区域绿色空间的优化提升可从土地利用管理和山地植物地境保持两方面展开。一方面，需要加强对土地利用转化的追踪和管控，严守城镇开发边界，优化城乡建设用地结构，提升建设用地的紧凑度，从而降低城镇开发建设对各类绿色空间的规模损失和格局破碎影响；另一方面，考虑山地地区的植物类型丰富度、生长状况、根系深度等植被地境特征均低于丘陵地区[21]，山区生态修复需要基于本地气候和地表条件出发，通过提升覆土厚度、增加土壤肥力、栽植优势种等措施优化植物根系环境与群落生长稳定性，改善生态环境。

4.2 研究展望

首先，研究受限于数据精度和获取年份，仅分析南太行城镇群近 20 年绿色空间演变，未来研究可提升数据精度，扩大研究时间范围，增加时间断面，并建立模拟场景预测未来变化。其次，本研究主要聚焦绿色空间的面积变化，未来可深入城镇扩张、生态系统服务、气候变化等研究内容，从而更好地反映南太行城镇群生态环境的总体变化情况。最后，可参考典型的高原、山脉、流域的环境研究，引入地形起伏度、地形位指数、坡谱等地形特征指数，以三维视角展示山地地形特征与绿色空间的演变规律。

5 结论

研究定量测度了 2000—2020 年南太行城镇群绿色空间及景观格局的演变过程与驱动机制，主要结论如下：

1）南太行城镇群绿色空间的主要类型为耕地和林地，近 20 年来绿色空间总面积呈下降趋势，耕地和草地面积持续减少，林地和水域面积有所增加。各县（市、区）绿色空间动态度由总体相近逐渐呈现分布差异。

2）2000—2020 年，绿色空间大量转为建设用

地。耕地转出面积最大，集中于城镇群北部和中部组团。非绿色空间主要转为耕地，呈现中部组团分布和南部带状分布。

3）多类绿色空间的景观格局指数呈下降趋势，多数绿地斑块数量降低，破碎度增加，景观优势度降低，景观连接性降低。耕地的聚集程度有所降低，其他绿色空间聚集程度有所增加。

4）县（市、区）尺度下，城镇发展和地形地貌与绿色空间面积存在相关性。地形地貌因子解释力最为显著，社会经济与自然环境因子之间的交互作用驱动了各类绿色空间面积变化。

参考文献

[1]成超男,胡杨,赵鸣.城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究进展与展望[J].地理科学进展,2020,39(10):1770-1782.

[2]冯一凡,冯君明,李翅.生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展[J].生态学报,2023,43(14):5648-5661.

[3]YUAN Y Y,TANG S Q,GUO W,et al.Spatiotemporal dynamics and driving factors of green-blue space in high-density cities: evidence from central Nanjing[J].Ecological Indicators,2024,160:111860.

[4]高梦瑶,李翅.黄河下游城市区域绿色空间时空演变的规律与机制[J].北京林业大学学报,2023,45(3):113-126.

[5]冯君明,冯一凡,李翅.黄河滩区绿色空间格局及生态系统服务研究进展[J].城市建筑,2021,18(31):171-174.

[6]CHEN Q,ZHENG L,WANG Y,et al.A comparative study on urban land use eco-efficiency of Yangtze and Yellow Rivers in China:from the perspective of spatiotemporal heterogeneity,spatial transition and driving factors[J].Ecological Indicators,2023,151:110331.

[7]冯君明,李翅,马俊杰,等.黄河滩区周边城镇生境质量及景观格局的时空演变[J].城市建筑,2023,20(11):1-5,9.

[8]王圳峰,刘燕,王欣珂,等.福建省绿色空间时空演变及驱动因素分析[J].广西师范大学学报(自然科学版),2022,40(4):227-246.

[9]CHEN X,ZHANG M L,ZHANG W C.Landscape pattern changes and its drivers inferred from salt marsh plant variations in the coastal wetlands of the Liao River Estuary,China[J].Ecological Indicators,2022,145:109719.

[10]WU S Z,WANG D Y,YAN Z R,et al.Spatiotemporal dynamics of urban green space in Changchun: changes,transformations,landscape patterns,and drivers[J].Ecological Indicators,2023,147:109958.

[11]冯一凡,李翅,冯君明.基于 GTWR 模型的济南都市圈生态系统服务价值对城市扩张时空响应[J].北京林业大学学报,2024,46(1):104-118.

[12]张若婧,陈跃红,张晓祥,等.基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(4):72-80.

[13]叶林,邢忠,颜文涛.山地城市绿色空间规划思考[J].西部人居环境学刊,2014,29(4):37-44.

[14]曹建生,张万军,阳辉,等.北方土石山区生态修复与水源涵养研究进展与展望[J].中国生态农业学报,2018,26(10):1546-1554.

[15]黄辉,郑昌玲,张劲松,等.1980—2019 年南太行地区气候变化趋势[J].应用生态学报,2022,33(8):2139-2145.

[16]陈阳,王西平,甄娜,等.基于生态系统服务理论内涵的山水林田湖草生态保护修复实践:以河南省南太行地区试点工程为例[J].环境工程技术学报,2021,11(4):701-710.

[17]冯君明,冯一凡,李翅,等.河势特征分界下的黄河滩区周边城镇生境质量与景观格局演变[J].生态学报,2023,43(16):6798-6809.

[18]施智勇,谢慧黎,王圳峰,等.基于参数最优地理探测器的福州市生境质量时空格局与驱动力分析[J].环境工程技术学报,2023,13(5):1921-1930.

[19]时凯,闫丰,王宗超,等.基于最优参数地理探测器的京津冀植被覆盖演化多元驱动力解析[J/OL].环境科学.[2024-07-01].https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202403036.

[20]李方正,解爽,李雄.基于 PLSR 模型的北京市中心城绿色空间演变驱动机制研究(1992—2016 年)[J].北京林业大学学报,2019,41(4):116-126.

[21]张开心,王西平,朱洪生,等.不同地貌形态下植物地境结构特征研究:以河南省南太行地区为例[J].中南林业科技大学学报,2023,43(2):124-132.