山地平原过渡带地形起伏特征及其对景观格局的影响——以太行山淇河流域为例

张静静, 朱文博, 赵芳, 朱连奇*, 李茂娟, 朱明, 张晓东

河南大学环境与规划学院, 开封 475004

* 通讯作者, E-mail: lqzhu@henu.edu.cn

收稿日期: 2017-03-27; 收修改稿日期: 2017-11-28; 接受日期: 2017-12-01; 网络版发表日期: 2018-01-29

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2015CB452702)和国家自然科学基金项目(批准号: 41671090和41601091)资助

摘要 地形对过渡带景观格局的形成起关键作用, 定量探讨其作用机理有助于科学解释复杂地域单元的景观格局, 从而深入理解其演变过程. 文章以位于山地平原过渡带的太行山淇河流域为例, 采用均值变点法提取地形起伏度, 从类型和景观两个尺度探讨地形起伏度对景观格局的影响, 并利用Logistic回归模型研究不同地形起伏度区自然和人为因素与景观格局的定量关系, 从而阐释其影响机理. 结果表明: (1) 淇河流域地形以小起伏(70~200m)为主, 主要位于淇河中上游; 其次为平坦(0~30m)及微起伏(30~70m), 位于研究区两端及中部林州境内; 中起伏(≥ 200 m)占比例较少, 位于河南与山西及林州与鹤壁的交界处. (2) 随地形起伏度增加, 景观类型由人为景观逐渐向自然景观过渡, 景观多样性和破碎度先增后减, 蔓延度和聚集度先减后增. (3) 随地形起伏度增加, 对景观类型分布具有解释作用的因素逐渐由人为因素占主导转为以自然因素占主导. 同时, 人为干扰的综合影响逐渐减弱, 在平坦区人为干扰使林地和草地分布概率比自然状态下分别减少41.26%和7.74%, 而在中起伏区两者的分布概率仅减少1.36%和0.22%. 由此可见, 山地平原过渡带显著的地形起伏特征带来的水热与人为活动的差异是景观格局形成的直接原因.

关键词 山地平原过渡带, 地形起伏度, 均值变点法, 景观格局, Logistic回归分析, 影响机理

1 引言

山地平原过渡带是山地与平原两大地域单元的交接地带, 具有明显的自然地理边缘效应, 形成高度异质的景观特征; 同时显著的地形起伏特征通过对景观格局的自然选择作用以及对人类活动的限制作用, 使景观格局呈现明显的空间分异规律(管华, 2006; 哈凯等,

2015). 因此, 地形是山地平原过渡带景观格局空间分异的主导控制因子, 通过立地条件影响陆地生态系统物质与能量的再分配, 并通过干扰发生频率及强度来影响景观格局(Pe'er等, 2006; Zhang和Yao, 2016). 近年来地形因子与景观格局的关系已成为自然地理学与生态学研究的重要内容之一(Odgaard等, 2014; Hais等, 2016; Walz等, 2016), 科学探讨地形分异对景观格局的

中文引用格式: 张静静, 朱文博, 赵芳, 朱连奇, 李茂娟, 朱明, 张晓东. 2018. 山地平原过渡带地形起伏特征及其对景观格局的影响——以太行山淇河流域为例. 中国科学: 地球科学, 48: 476–486, doi: [10.1360/N072016-00417](https://doi.org/10.1360/N072016-00417)

英文引用格式: Zhang J J, Zhu W B, Zhao F, Zhu L Q, Li M J, Zhu M, Zhang X D. 2018. Spatial variations of terrain and their impacts on landscape patterns in the transition zone from mountains to plains—A case study of Qihe River Basin in the Taihang Mountains. Science China Earth Sciences, 61: 450–461, <https://doi.org/10.1007/s11430-016-9158-2>

影响, 有助于深入了解景观格局的空间分异规律以及为景观格局空间优化奠定基础.

地形为景观格局的形成提供物理模板, 同时还制约着景观的演变过程. 已有研究宏观地分析了地形在景观格局研究中的重要性, 指出在森林生态系统研究和管理中以及在评估农业景观中自然植被变化的人为影响时要充分考虑地形的制约作用(Dorner等, 2002; Lippok和Schleuning, 2013; Pekin, 2016); 通过将三维地形结构整合到景观格局的研究中, 发展了一种适用于地形复杂区的三维景观指数(Hoechstetter等, 2008; Walz等, 2016). 同时借助GIS空间分析和典范对应分析(CCA)等方法, 探究了不同尺度地形对景观格局的影响(赵卫权等, 2010; 张春英和张春玲, 2012; 哈凯等, 2015), 并分析了地形对景观格局演变过程的影响(国巧真等, 2015). 研究发现景观格局的空间分布存在明显的地形梯度特征, 随地形级别的增加, 人工生态系统逐渐向自然生态系统过渡, 而景观格局演变的速度逐渐减缓. 但已有研究仅限于两者关系的表象分析, 缺乏其作用机理的定量探讨, 尤其针对山地平原过渡带小流域尺度的研究更是少见. 流域已成为研究陆地表层系统科学的绝佳单元, 是“水-土-气-生-人”集成研究的基地(程国栋和李新, 2015), 选择地貌类型齐全的小流域作为案例, 定量探讨地形对景观格局的影响机理, 从而更深刻地认识格局对过程的制约作用, 同时对于构建一个可代表区域景观格局形成机理的空间异质性的网络, 具有重要的意义.

显著的地形起伏是山地平原过渡带的主要地形特

征, 对景观格局的形成和变化起关键作用(管华, 2006). 地形起伏度是表征地形起伏特征的定量指标, 能直观反映地形地貌特征(范建容等, 2015); 但地形起伏度的计算具有不确定性及计算尺度的依赖性, 科学界定其计算尺度(即最佳统计单元)是确定区域地形起伏度的关键(Prima等, 2006). 根据已有研究, 非人工判别法中的“均值变点分析法”能够快速、准确地确定最佳统计单元, 得到了广泛应用(范建容等, 2015; Yu等, 2015). 本文选择位于太行山南段向华北平原过渡地带的淇河流域开展研究, 利用该方法提取地形起伏度, 从类型和景观两个尺度探讨地形起伏度与景观格局的关系, 并采用Logistic回归模型研究不同地形起伏度区自然和人为活动与景观格局的定量关系, 阐释其影响机理. 研究有助于甄别复杂地域单元景观格局形成的主控因素, 准确识别人为干扰的相对作用, 构建能有效调节生态过程的景观格局分布模式, 同时为不同地貌单元人类活动强度的调整提供理论基础.

2 研究区概况

淇河流域地处太行山南段东麓, 介于 $113^{\circ}17' \sim 114^{\circ}23'E$ 和 $35^{\circ}32' \sim 36^{\circ}04'N$ 之间, 位于中国地形第二阶梯的东缘, 东与华北平原相接(图1). 淇河是海河水系卫河的支流, 发源于山西陵川, 流经山西壶关以及河南的辉县、林州、鹤壁、淇县和浚县, 于浚县刘庄和共产主义渠相汇并最终流入卫河; 全长约165km, 流域面积2227km². 海拔自西向东递减, 高差起伏较大. 河流、谷

图 1 研究区位置及高程示意图

地横穿研究区,地貌类型有盆地、平原、丘陵及山地,86%的区域为丘陵和山地。年均气温11.9℃,年均降水量573.7mm,属暖温带半湿润季风气候。该区植被垂直分异明显,根据太行山南段植被垂直带谱的记录(邝生舜, 1991; 茹文明, 1993),自下而上依次出现低山灌丛及农作物带、低中山落叶阔叶林带、中山针阔叶混交林带、山顶灌丛草甸带。

3 数据与研究方法

3.1 基础数据

DEM数据来源于ASTER GDEM,经拼接、投影、裁剪得到研究区DEM。土地利用数据是基于2015年的Landsat 8遥感影像(来源于地理空间数据云, <http://www.gscloud.cn/>),参考2005年该区1:10万土地利用类型图(来源于黄河下游科学数据中心, <http://www.geo-data.cn/>),进行人工目视解译,根据中国土地资源分类系统(刘纪远, 1997),得到2015年土地利用二级类型图,并进行实地调研验证,解译精度达到86%。然后在ArcGIS中将二级类合并为一级类,并赋予一级类型图中的斑块新的属性,即景观类型,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六类,并由矢量转为栅格格式,以在Fragstats中进行景观指数的计算。

本文所选自然和人为因子分别为受地形起伏影响较大的水热及人为干扰因子。水热因子主要为气温和降水,由山西省和河南省气象局提供,共10个气象站点的2015年年均气温和年降水量,并利用ANUSPLIN插值软件,以经纬度为自变量,海拔高度为协变量,分别进行插值得到栅格数据。人为干扰因子选取人口密度和距离因素,人口密度来源于2016年《山西省统计年鉴》和《河南省统计年鉴》,并进行空间栅格化。距离因素是借助欧氏距离法对农村居民点和道路数据计算得到,农村居民点是由上述土地利用二级类型图提取得到,道路数据来源于黄河下游科学数据中心。本文的栅格数据统一使用Grid格式,空间分辨率为30m,地理坐标系采用WGS_1984_Albers。

3.2 研究方法

本文首先利用均值变点法提取地形起伏度,然后分别从类型和景观两个尺度探讨地形起伏度对景观格局的影响。按地形指数划分流域并分别模拟不同地形

特征下的逐日水量平衡,能提高模拟精度(邓慧平和孙菽芬, 2012)。而不同地形特征下景观格局形成的主控因素有很大的差别,因此本文按照地形起伏度划分流域,即对地形起伏度进行分级,并利用Logistic模型分析不同地形起伏度区景观格局与驱动因子之间的关系,从而揭示其影响机理。本文的技术路线如图2所示。

3.2.1 地形起伏度的提取

地形起伏度的计算具有尺度依赖性。本文首先采用移动窗口法计算不同尺度的地形起伏度,对DEM依次开辟 $n \times n$ ($n=2, 3, \dots, 30$)像元大小的窗口,计算各窗口下每个栅格邻域海拔的最大值和最小值之差,即不同窗口下的地形起伏度,其平均值随窗口大小的变化呈对数曲线特征(图3a),拟合度为0.97。可见,在8~15万 m^2 曲线上出现由陡变缓的点,称为变点。变点对应的窗口大小即为最佳统计单元。

然后采用均值变点法确定变点,该方法是基于数理统计的一种分析方法,可用来计算一系列数据中出现异常、发生突变的点,对恰有一个变点的计算最有效(范建容等, 2015)。步骤如下:

(1) 将不同窗口下地形起伏度平均值与对应窗口面积依次相除,得到各窗口下单位面积起伏度 T_i ,对其取对数,得到数列 $\{X_i\}$,见式(1),并计算出数列方差 S 为18.66。

$$X_i = \ln T_i \quad (1)$$

式中, i 为窗口个数,取值1, 2, 3, ..., 29。

(2) 令 $i=2, 3, \dots, 29$,每一个 i 值将数列分成两部分,即 $\{X_1, X_2, \dots, X_{i-1}\}$ 和 $\{X_i, X_{i+1}, \dots, X_{29}\}$,然后分别求每部分的算术平均值 X_{i1} 、 X_{i2} 和统计量 S_i :

$$S_i = \sum_{t=1}^{i-1} (X_t - X_{i1})^2 + \sum_{t=i}^{29} (X_t - X_{i2})^2 \quad (2)$$

(3) 求取 S 与 S_i 的差值,差值达到最大时对应的窗口面积即为最佳统计单元的大小。

图3b显示了 S 与 S_i 差值数据序列的变化曲线,在第10个点(即 $i=11$)差值达到最大(13.61),该点对应的窗口为12×12像元。由此得出,利用30m分辨率的DEM数据计算淇河流域地形起伏度的最佳统计单元大小为0.13km²。基于此,得到淇河流域地形起伏度为0~503m,平均为105.7m。

图 2 技术路线

图 3 地形起伏度平均值与窗口大小的关系(a)以及 S 与 S_i 差值的变化曲线(b)

3.2.2 景观格局指数的计算

景观格局指数高度浓缩了景观格局的信息,能够定量表征景观的结构组成及其空间配置特征(郭建国, 2007). 为全面反映研究区景观格局破碎度和多样性的空间分异特征,以定量比较不同地形特征上自然和人为因素对景观格局综合影响的差异,本文选取景观水平上斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、蔓延度(CONTAG)和聚集度(AI)反映景观破碎度,选取Shannon多样性指数(SHDI)和Shannon均匀度指数(SHEI)反映景观多样性. 然后采用Fragstats中的移动窗口法,通过筛选选择边长为2800m的矩形窗口进行计算;由于计算结果返回中心栅格,因此先对研究区做宽度为1400m的缓冲区再进行计算,从而得到研究区完整的景观指数空间分布,同时消除了边界效应的影响. 以上指数的计算公式及生态学意义详见文献(Li和Wu, 2004; 郭建国, 2007).

3.2.3 景观格局形成机理的分析

当因变量是二分类变量时,常采用Binary Logistic回归模型进行分析. 已有学者利用该模型定量分析区

域土地利用格局变化的驱动因素(荣子容等, 2012; Achmad等, 2015). 并采用Pontius和Schneider(2001)提出的ROC曲线(Relative Operating Characteristics)对模拟结果进行检验,当ROC值大于0.7时,表示所选驱动因素具有较好的解释能力. 本研究运用该模型定量分析不同地形起伏度区景观格局与驱动因子的关系,从而揭示景观格局的形成机理.

为了更准确地识别人为干扰因子对林地和草地的综合作用在不同地形起伏度区的差异,首先根据Logistic回归系数,在ArcGIS栅格计算器中计算林地和草地的实际分布概率,然后计算不考虑人为因子情况下的分布概率,即潜在分布概率;进而采用两者差值衡量不同地形起伏度区人为干扰的综合影响,差值大于0,表明人为干扰对景观分布有正向影响,差值小于0,表明人为干扰对景观分布有负向影响.

4 结果分析

4.1 淇河流域地形起伏度空间分异特征

由图4a发现,淇河流域地形起伏度分布比例分别

图 4 淇河流域地形起伏度分布比例与累计频率及其空间分布图

在30m和122m附近出现峰值；在地形起伏度为200m时，累计频率已达到91.68%，表明地形起伏度以中低值为主。

参考中国数字地貌制图规范中的分级标准(周成虎等, 2009), 并结合研究区复杂多样的地形特征, 将地形起伏度划分为4个等级(表1; 图4b)。可见, 淇河流域地形以小起伏为主(56.29%), 主要位于淇河中上游, 分别以中起伏区为中心向东西两侧展开; 其次是微起伏(21.08%), 主要分散分布在淇河中下游, 部分集中分布在最西端的陵川与壶关境内; 平坦区占14.31%, 位于林州境内及下游区域; 中起伏占8.32%, 约185km², 主要位于河南与山西交界处, 小部分位于林州与鹤壁交界处。

4.2 地形起伏度对景观格局的影响

4.2.1 地形起伏度对景观类型空间分布的影响

淇河流域景观类型以草地、林地和耕地为主, 其次为建设用地、水域和未利用地(图5a), 并统计景观类型在不同地形起伏度上的分布(图5b)。可见, 随地形起伏度增加, 各类型所占比例的变化可分为三种类型: 持续减少型, 包括耕地、建设用地和水域; 先增加后减少型, 包括草地和未利用地; 持续增加型, 只有林地。平坦区优势景观为耕地, 其次为建设用地, 两者占92.5%, 该区为人类活动的热点地区, 是人地矛盾最激烈的区域, 如何进行合理的资源配置以实现经济发展和粮食安全的共赢, 是该区亟待解决的问题。在微起伏和小起伏区, 各景观类型均有分布, 微起伏区优势景观为耕地(56.58%), 其次为草地(27.71%), 小起伏区优势景

表 1 淇河流域地形起伏度统计结果

地形起伏度(m)	像元数量(个)	面积(km ²)	面积比例(%)
0~30(平坦)	354210	318.79	14.31
30~70(微起伏)	521600	469.44	21.08
70~200(小起伏)	1393108	1253.8	56.29
≥200(中起伏)	205842	185.25	8.32
合计	2474760	2227.28	100

观为草地(42.61%)和林地(40.39%), 耕地占15.04%。该区为自然景观和人为景观的交错分布带, 两者存在激烈的竞争关系, 边缘效应明显, 表现为人为景观向自然景观过渡, 应重点协调两者的关系, 土地结构优化要坚持生态保护为主、资源开发为辅的原则。在中起伏区, 优势景观为林地(66.6%), 其次为草地(28.4%), 自然景观占绝对优势, 人类的开发利用活动受到限制, 因此应充分发挥其生态屏障的作用。

4.2.2 地形起伏度对景观指数空间分布的影响

为定量分析淇河流域地形起伏度与景观格局的关系, 统计基于栅格的地形起伏度值与景观指数, 并进行多项式拟合(图6)。可见, 随地形起伏度增加, 景观指数的变化趋势可分为两种类型: 先增加后减少型, 包括PD、LSI、SHDI、SHEI, 拟合度分别为0.78、0.71、0.67、0.57; 先减少后增加型, 包括CONTAG和AI, 拟合度分别为0.50和0.68。PD、LSI、SHDI和SHEI空间分布具有相似性, PD和LSI大的区域, SHDI和SHEI也较高, 高值区主要分布在地形起伏度适中的区域, 自然景观和人为景观交错分布, 类型丰富, 破碎度高, 形状

图 5 景观类型的空间分布及其随地形起伏度的变化

图 6 淇河流域不同景观指数与地形起伏度的关系

(a) 斑块密度(PD); (b) 景观形状指数(LSI); (c) 蔓延度(CONTAG); (d) 聚集度(AI); (e) Shannon多样性指数(SHDI); (f) Shannon均匀度指数(SHEI)

复杂, 多样性和均匀度也较高, 低值区主要分布在地形起伏度偏小或偏大的区域, 景观类型单一, 呈连片分布, 破碎度低, 多样性和均匀度也较低. CONTAG和AI空间分布相似, 聚集度高的区域连通性较好, 蔓延度也较高, 高值区和低值区的分布与上述四个指数表现出相反的特征. 由此可见, 地形起伏度是景观格局空间分异的重要影响因素之一.

由表2发现, 平坦区CONTAG和AI达到最大, PD、LSI、SHDI和SHEI相对较小, 该区自然景观连片分布, 斑块密度小, 形状规则, 多样性和均匀度较低, 蔓延度和聚集度达到最大. 微起伏区PD、LSI、SHDI和SHEI

达到最大, CONTAG和AI较小, 该区景观类型丰富, 而且分布相对均匀. 小起伏区优势景观类型有所减少, 与微起伏区相比, PD、LSI、SHDI和SHEI略有减小, CONTAG和AI有所增加. 在中起伏区, 主要为自然景观, 类型单一, 斑块面积大, 景观指数分布与平坦区类似, 但形状相对更复杂. 由此可见, 微起伏区景观异质性最强, 多样性和均匀度达到最大, 破碎化最严重, 连通性和聚集度最差. 而小起伏区景观多样性略有降低, 但破碎化程度和连通性有所改善, 受干扰程度相对减少, 生物多样性水平高, 应该是今后生态保护的关键区. 但需要注重景观斑块的规划, 改善景观破碎化现

表 2 不同地形起伏度上的景观指数

地形起伏度类别	PD(个 km^{-2})	LSI	CONTAG(%)	AI(%)	SHDI	SHEI
平坦	3.07	4.39	60.51	96.78	0.77	0.61
微起伏	4.51	6.14	55.02	95.01	0.91	0.68
小起伏	3.99	5.88	55.08	95.05	0.80	0.67
中起伏	2.55	4.41	60.32	96.28	0.71	0.55

状, 维持该区生物多样性和稳定性.

4.3 地形起伏度对景观格局的影响机理

表3统计了不同地形起伏度区景观格局与驱动因素之间的Logistic回归结果, ROC值均在0.7以上, 表明所选驱动因子对景观格局的形成具有较强的解释能力. 在中起伏区耕地、建设用地和水域以及小起伏区建设用地和水域分布极少, 所以没有进行模拟.

耕地在平坦区主要受人为因素影响, 人口密度增加1人 km^{-2} , 耕地分布概率减少0.07%, 距居民点及道路距离分别增加1m, 分布概率减少0.01%和0.02%; 在微起伏区受自然和人为因素的共同影响, 降水量增加1mm, 分布概率减少0.25%, 而与人口密度变为正相关, 增加1人 km^{-2} , 分布概率增加0.04%; 在小起伏区主要受自然因素影响, 气温增加1℃, 分布概率减少8.30%, 降水量增加1mm, 分布概率增加0.13%, 在偏远山区由于地形限制造成了只能靠天吃饭的种植模式.

林地和草地在平坦区主要受人为因素影响, 人口密度增加1人 km^{-2} , 两者分布概率分别减少0.83%和0.22%, 距居民点距离增加1m, 分布概率分别增加0.04%和0.03%, 草地还受自然因素的影响, 气温越低, 降水越丰富, 其分布概率越大; 在微起伏区受自然和人为因素的共同影响, 气温增加1℃, 林地和草地分布概率增加1.67%和5.01%, 人口密度增加1人 km^{-2} , 分布概率减少0.43%和0.03%, 受人为因素的影响较平坦区有所减弱; 林地和草地在小起伏区受气温的影响有所增强, 气温增加1℃, 分布概率分别增加12.2%和6.39%, 而草地的分布概率与降水量变为负相关, 其次与距道路距离存在相关, 但相关性不显著; 在中起伏区, 林地和草地受自然因素的影响进一步增强, 气温增加1℃, 分布概率分别增加34.84%和11.34%, 降水量增加1mm, 林地分布概率增加0.62%, 而草地分布概率减少0.48%, 其次人口密度对两者也有贡献, 但贡献不大.

对水域和建设用地的分布具有解释能力的因素相

对较少, 且显著性不高. 在平坦区, 主要受人为因素和降水量的影响, 人口密度越大, 水域分布概率越小, 而建设用地越多; 距居民点越远, 水域分布概率越大, 但建设用地分布概率降低; 降水越丰富, 两者的分布概率均增大. 在微起伏区, 人口密度越大或降水越多, 两者的分布概率越大.

综上所述, 在低地形起伏区, 人为因素对景观类型的分布有较强的解释作用, 人为景观占优势; 在高地形起伏区, 自然因素对景观类型的分布存在较大贡献, 以自然景观为主; 而在微起伏区, 受自然和人为因子的共同作用, 因此该区景观类型最丰富, 多样性高, 异质性强.

由图7和8发现, 随地形起伏度增加, 人为因素对林地和草地的影响逐渐减弱, 并且对林地的影响强于对草地的影响. 在平坦区, 人为干扰对林地和草地的分布既有正向影响又有负向影响, 正向影响的区域极少, 主要分布在最西端陵川境内, 该区域海拔较高, 但地形起伏度较小, 为生态工程的实施提供了有利条件; 平坦区人为活动对林地和草地整体上表现为较强的负向影响, 使林地和草地的分布概率比自然状态平均下降了41.26%和7.74%. 在微起伏和小起伏区, 人为干扰对林地和草地均为负向影响, 使分布概率平均下降22.06%和3.77%、7.36%和2.68%. 在中起伏区, 林地和草地受人为干扰的影响最弱, 分布概率仅下降1.36%和0.22%.

5 讨论与结论

5.1 讨论

(1) 地形起伏度对景观破碎度的影响分析. 平坦区的PD(3.07个 km^{-2})低于小起伏区的PD(3.99个 km^{-2}), 而平坦区的CONTAG(60.51%)高于小起伏区的CONTAG(55.08%)(表2), 表明以人为景观为主的平坦区的景观破碎度, 低于以自然景观为主的地形起伏度较大地区的景观破碎度. 这可能是由于本文使用30m分辨

表 3 不同地形起伏度类别上景观格局与驱动因素之间的Logistic回归结果^{a)}

驱动因子		常量	气温(℃)	降水量(mm)	人口密度 (人 km ⁻²)	距农村居民 点距离(m)	距主要道路 距离(m)	ROC值	
平坦	耕地	Beta系数	1.7764	—	—	-0.0007	-0.0001	-0.0002	0.726
		Exp(B)	5.9088	—	—	0.9993	0.9999	0.9998	
	林地	Beta系数	-1.6227	—	—	-0.0083	0.0004	—	0.833
		Exp(B)	0.1974	—	—	0.9917	1.0004	—	
	草地	Beta系数	-2.4553	-0.0882	0.0032	-0.0022	0.0003	—	0.716
		Exp(B)	0.0858	0.9156	1.0032	0.9978	1.0003	—	
	水域	Beta系数	-3.2982	—	0.0007	-0.0008	0.0001	—	0.711
		Exp(B)	0.0369	—	1.0007	0.9992	1.0001	—	
	建设用地	Beta系数	-2.9593	—	0.0016	0.0017	-0.0002	—	0.721
		Exp(B)	0.0519	—	1.0016	1.0017	0.9998	—	
微起伏	耕地	Beta系数	1.2366	—	-0.0025	0.0004	—	—	0.732
		Exp(B)	3.4438	—	0.9975	1.0004	—	—	
	林地	Beta系数	-2.8390	0.0167	0.0032	-0.0043	—	—	0.714
		Exp(B)	0.0585	1.0168	1.0032	0.9957	—	—	
	草地	Beta系数	-3.8094	0.0501	0.0043	-0.0003	—	—	0.727
		Exp(B)	0.0222	1.0514	1.0043	0.9997	—	—	
	水域	Beta系数	-0.5792	—	0.0005	0.0020	—	—	0.704
		Exp(B)	0.5603	—	1.0005	1.0020	—	—	
	建设用地	Beta系数	-2.7482	—	0.0001	0.0004	—	—	0.732
		Exp(B)	0.0640	—	1.0001	1.0004	—	—	
小起伏	耕地	Beta系数	0.5692	-0.0867	0.0013	—	0.0001	—	0.716
		Exp(B)	1.7668	0.9170	1.0013	—	1.0001	—	
	林地	Beta系数	-2.0510	0.1151	—	—	—	-0.0001	0.751
		Exp(B)	0.1286	1.1220	—	—	—	0.9999	
	草地	Beta系数	-1.1361	0.0639	-0.0013	—	—	-0.0002	0.754
		Exp(B)	0.3211	1.0660	0.9987	—	—	0.9998	
中起伏	林地	Beta系数	-0.6458	0.2989	0.0062	-0.0002	—	—	0.766
		Exp(B)	0.5242	1.3484	1.0062	0.9998	—	—	
	草地	Beta系数	-1.0262	0.1074	-0.0048	-0.0001	—	—	0.758
		Exp(B)	0.3584	1.1134	0.9952	0.9999	—	—	

a) -表示未通过0.05显著性检验; Beta系数为回归系数, Exp(B)为发生比率, 衡量驱动因子对景观格局的影响程度

率的数据, 导致作为廊道的道路与河流对景观格局的切割作用没有体现出来. 有研究表明破碎度对于粒度变化最敏感(高江波和蔡运龙, 2010), 而小尺度区域景观破碎度的分析对粒度的要求更高(江东等, 2016). 未来的研究应该使用更高分辨率的影像, 并结合实地调查以提高数据精度, 从而探究小尺度区域地形起伏度与景观格局指数特别是与破碎度的相关关系的粒度

效应.

(2) 地形起伏度对景观格局的影响机理分析. 以上4.3节的讨论表明, 在不同地形起伏度类别上, 自然和人为因素的组合状况是景观格局形成的决定性因素. 由图9可见, 随地形起伏度增加, 自然因素中气温逐渐降低, 降水量逐渐增多, 人为因素中人口密度逐渐减小, 距道路和居民点的距离逐渐增大. 在平坦和中起

图7 不同地形起伏度类别上林地和草地实际与潜在分布概率差值的空间分布

(a)~(d) 平坦、微起伏、小起伏及中起伏区的林地实际与潜在分布概率之差; (e)~(h) 平坦、微起伏、小起伏及中起伏区的草地实际与潜在分布概率之差

图8 实际与潜在分布概率的平均差值随地形起伏度的变化

伏区, 自然和人为因素的组合条件较差, 人为景观和自然景观分别占据优势, 因此类型单一, 多样性和破碎度较低, 聚集度和蔓延度较大。在微起伏和小起伏区水热条件适宜, 人口密度和可达性适中, 其中微起伏区自然和人为因素组合条件最佳, 景观类型受自然和人为活动的共同影响, 自然景观与人为景观交错分布, 类型丰富, 多样性高, 同时破碎度也达到最高, 说明适当的人为干扰有利于增强景观多样性, 但同时加剧了景观破碎度。

本研究利用Logistic回归模型不仅对景观格局形成的具体影响因素进行了系统的定量分析, 并利用景观类型实际与潜在分布概率的差值估算了人为干扰的综合影响。相比以往研究所采用的定性方法及相关分

析方法等(肖翠等, 2014; 刘吉平等, 2016)更具有解释能力和说服力; 与Jaimes等(2010)和荣子容等(2012)分别使用的地理加权回归和Logistic回归仅定量分析了各人为因子的作用相比, 本文突出了对人为干扰的综合作用的探究。本文的思路和方法更有助于认识自然和人为活动在景观格局形成和变化中的相对作用, 而且对于自然和人为干扰对生态过程影响的定量研究具有重要的借鉴意义。

此外, 流域尺度土壤性质和水文过程等也会引起景观格局的变化, 未来的研究应该以系统论为指导, 全面分析由地形分异引起的气候、土壤、水文以及人为干扰程度等的差异对景观格局的影响, 并考虑各影响因素之间的协同效应, 进一步明确不同地形特征下流域景观格局的主控因素, 从而更准确地认识地形对景观格局的影响机理。

5.2 结论

太行山淇河流域位于山地平原过渡带, 随着地形的变化, 土壤、植被、气候(气温和降水)等自然地理要素发生了明显变化, 形成了山地垂直带谱, 从而构建了流域的特殊景观格局。本文运用景观生态学原理, 采用相关分析和Logistic回归分析, 不仅揭示了地形起伏度与景观格局的直接关系, 而且探讨了两者的关系的机理。结论如下:

(1) 淇河流域地形以小起伏(70~200m)为主, 主要

图 9 自然(a)和人为(b)因素随地形起伏度的变化

位于淇河中上游; 其次为平坦(0~30m)及微起伏(30~70m), 位于研究区两端及中部林州境内; 中起伏(≥200m)占比例较少, 位于河南与山西及林州与鹤壁的交界处。

(2) 随地形起伏度增加, 景观类型由人为景观逐渐向自然景观过渡, 景观多样性和破碎度先增后减, 蔓延度和聚集度先减后增。在微起伏区多样性和均匀度达到最大, 破碎化最严重, 连通性和聚集度最差。而小起伏区景观多样性略有降低, 但破碎度和连通性有所改善, 受干扰程度相对减少, 生物多样性水平高, 应该是今后生态保护的关键区。通过地形对景观格局的影响研究, 可以丰富保护关键区的理论研究, 同时对该区开展有效保护区的建立具有指导意义。

(3) 随地形起伏度增加, 自然和人为因子的组合条件不断发生变化, 在微起伏区组合条件达到最佳。在低地形起伏区, 人为因子对景观类型的分布有较强的解释作用; 在高地形起伏区, 自然因素对景观类型的分布存在较大贡献。随地形起伏度增加, 人为干扰的综合影响逐渐减弱, 在平坦区人为干扰使林地和草地分布概率比自然状态下分别减少41.26%和7.74%, 而在中起伏区两者的分布概率仅减少1.36%和0.22%。

参考文献

- 程国栋, 李新. 2015. 流域科学及其集成研究方法. 中国科学: 地球科学, 45: 811–819
- 邓慧平, 孙淑芬. 2012. 地形指数模型TOPMODEL与陆面模式SSiB的耦合及在流域尺度上的数值模拟. 中国科学: 地球科学, 42: 1083–1093
- 范建容, 张子瑜, 李立华. 2015. 四川省山地类型界定与山区类型划分. 地理研究, 34: 65–73
- 高江波, 蔡运龙. 2010. 区域景观破碎化的多尺度空间变异研究——

- 以贵州省乌江流域为例. 地理科学, 30: 742–747
- 管华. 2006. 秦岭-黄淮平原交界带自然地理边际效应. 北京: 科学出版社. 13–14
- 国巧真, 宁晓平, 王志恒, 蒋卫国. 2015. 地形地貌对半山区土地利用动态变化影响分析——以天津市蓟县为例. 国土资源遥感, 27: 153–159
- 哈凯, 丁庆龙, 门明新, 许峰. 2015. 山地丘陵区土地利用分布及其与地形因子关系——以河北省怀来县为例. 地理研究, 34: 909–921
- 江东, 阎晓曦, 付晶莹. 2016. 人类活动信息多尺度遥感影像提取的适用性比较——以灵武白芨滩自然保护区为例. 资源科学, 38: 1409–1422
- 邝生舜. 1991. 河南山地植被的垂直分布规律. 河南师范大学学报(自然科学版), 19: 91–95
- 刘吉平, 董春月, 盛连喜, 刘雁. 2016. 1955–2010年小三江平原沼泽湿地景观格局变化及其对人为干扰的响应. 地理科学, 36: 879–887
- 刘纪远. 1997. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究. 遥感学报, 1: 225–230
- 荣子容, 马安青, 王志凯, 周凯. 2012. 基于Logistic的辽河口湿地景观格局变化驱动力分析. 环境科学与技术, 35: 198–203
- 茹文明. 1993. 太行山南段植被的研究. 山西师范大学学报(自然科学版), 7(增刊): 54–58
- 郭建国. 2007. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 第2版. 北京: 高等教育出版社. 106–115
- 肖翠, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 边华菁, 徐伟. 2014. 浙江西门岛湿地景观格局与人为干扰度动态变化. 应用生态学报, 25: 3255–3262
- 张春英, 张春玲. 2012. 植被景观指数随复合地形因子分异的变化规律. 中国农学通报, 28: 65–68
- 赵卫权, 苏维词, 袁俊. 2010. 基于地形起伏度的贵州省景观空间格局分异特征. 水土保持研究, 17: 105–110
- 周成虎, 程维明, 钱金凯, 李炳元, 张百平. 2009. 中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究. 地球信息科学学报, 11: 707–724
- Achmad A, Hasyim S, Dahlan B, Aulia D N. 2015. Modeling of urban growth in tsunami-prone city using logistic regression: Analysis of

- Banda Aceh, Indonesia. *Appl Geogr*, 62: 237–246
- Dorner B, Lertzman K, Fall J. 2002. Landscape pattern in topographically complex landscapes: Issues and techniques for analysis. *Landsc Ecol*, 17: 729–743
- Hais M, Chytrý M, Horsák M. 2016. Exposure-related forest-steppe: A diverse landscape type determined by topography and climate. *J Arid Environ*, 135: 75–84
- Hoechstetter S, Walz U, Dang L H, Thinh N X. 2008. Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure. *Landsc Online*, 3: 1–14
- Jaimes N B P, Bosque Sendra J, Gómez Delgado M, Franco Plata R. 2010. Exploring the driving forces behind deforestation in the state of Mexico (Mexico) using geographically weighted regression. *Appl Geogr*, 30: 576–591
- Li H B, Wu J G. 2004. Use and misuse of landscape indices. *Landsc Ecol*, 19: 389–399
- Lippok D, Schleuning M. 2013. Topography and edge effects are more important than elevation as drivers of vegetation patterns in a neotropical montane forest. *J Veg Sci*, 25: 724–733
- Odgaard M V, Bøcher P K, Dalgaard T, Moeslund J E, Svenning J C. 2014. Human-driven topographic effects on the distribution of forest in a flat, lowland agricultural region. *J Geogr Sci*, 24: 76–92
- Pe'er G, Heinz S K, Frank K. 2006. Connectivity in heterogeneous landscapes: Analyzing the effect of topography. *Landsc Ecol*, 21: 47–61
- Pekin B K. 2016. Anthropogenic and topographic correlates of natural vegetation cover within agricultural landscape mosaics in Turkey. *Land Use Policy*, 54: 313–320
- Pontius Jr R G, Schneider L C. 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agric Ecosyst Environ*, 85: 239–248
- Prima O D A, Echigo A, Yokoyama R, Yoshida T. 2006. Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. *Geomorphology*, 78: 373–386
- Walz U, Hoechstetter S, Drăguț L, Blaschke T. 2016. Integrating time and the third spatial dimension in landscape structure analysis. *Landsc Res*, 41: 279–293
- Yu H, Luo Y, Liu S Q, Yang Y, Liu W D. 2015. The influences of topographic relief on spatial distribution of mountain settlements in Three Gorges Area. *Environ Earth Sci*, 74: 4335–4344
- Zhang B P, Yao Y H. 2016. Implications of mass elevation effect for the altitudinal patterns of global ecology. *J Geogr Sci*, 26: 871–877

(责任编辑: 陈利顶)