

市域尺度土地生态质量空间分异及其主控因子分析

——以焦作市为例

张合兵,王世东,刘毅

(河南理工大学测绘与国土信息工程学院,河南 焦作 454000)

摘要:以焦作市村级行政区为评价单元,从土地生态本底、生态结构、生态效益和生态胁迫 4 个方面构建指标体系,运用热点分析模型对焦作市土地生态质量的空间分异规律进行研究,将焦作市土地生态质量根据冷热点分值划分为 5 个等级。在热点分析的基础上,利用 CART 算法构建分类决策树,根据控制变量法得到的决策树分类精度对研究区内 22 个生态因子对全局土地生态质量的贡献度进行分析,最后用主成分分析法再确定每一个生态类型区的主控因子。结果表明,焦作市的土地生态质量大致呈现出“核心——边缘”结构,即由城镇中心向远郊土地生态质量呈上升趋势,而由水库、河流、风景区向城区方向土地生态质量呈下降趋势。其生态因子中生态服务价值具有最高贡献度,对焦作市土地生态质量影响最大。各级生态类型区由于空间位置的差异,影响其土地生态质量的主控因子也有显著差异。一二级生态空间分异类型区主控因子受人为因素影响较大,四五级生态空间分异类型区则主要受自然因素的影响,三级生态空间分异类型区受人为与自然双重因素影响,主控因子最多。

关键词:土地生态质量;主控因子;热点分析;决策树;主成分分析

中图分类号: X826 **文献标志码:** A

Research on spatial differentiation of land ecological quality and main controlling factors identification based on city scale: ——A case study of Jiaozuo City

ZHANG He-bing, WANG Shi-dong, LIU Yi

(School of Surveying and Land Information Engineering, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo, He'nan 454000, China)

Abstract: Using the village administrative district of Jiaozuo City as the evaluation unit, an index system including 4 criteria layers of basis, structure, efficiency and stress was established. The spatial variation of land ecological quality was studied by using hot spot analysis. The land ecological quality of Jiaozuo City based on the hot and cold spots were divided into 5 grades. The contribution of the 22 ecological factors were analyzed by the classification accuracy of decision tree in control variable method using the CART algorithm to construct decision tree based on the hot spot analysis. Finally, the main controlling factors of each ecological type region were determined using the principal component analysis method. The results showed that the land ecological quality of Jiaozuo city showed a characteristic of “core-periphery” structure, which the land ecological quality were declining from the town center to the outer and the land ecological quality rising from the reservoir, river, scenic area to the city. The ecological service value of the ecological factor has the highest degree of contribution and it has the greatest impact on the land ecological quality of Jiaozuo city. Due to the differences space location of each ecological type region, the main factors affecting the land ecological quality also has the remarkable difference. The main control factors of grade one and two ecological regions were more influenced by man-made factors. The main control factors of grade four and five ecological regions were mainly influenced by man-made factors. The grade three ecological regions were influenced by both human and natural factors, and it has the most main con-

收稿日期:2016-07-02 修回日期:2016-11-04
基金项目:国家自然科学基金项目(41541014,41301617);中国煤炭工业协会指导性计划项目(MTKJ-2015-284);中国博士后科学基金(2016M590679);河南省高等学校重点科研项目(17A420001);河南省高校基本科研业务费专项资金资助(NSFRF1630);河南理工大学创新性科研团队资助(B2017-16);河南省高校科技创新团队支持计划(18IRTSTHN008);河南理工大学青年骨干教师资助计划项目
作者简介:张合兵(1975—),男,河南滑县人,副教授,博士,主要从事土地利用方面的教学与科研工作。E-mail: jzhtzhb@hpu.edu.cn。
通信作者:王世东(1978—),男,河南清丰县人,副教授,博士,主要从事土地利用变化与土地复垦研究。E-mail: wsd0908@163.com。

trol factors.

Keywords: land ecological quality; main control factors; hot spot analysis; decision tree; principal component analysis

近年来,我国在工业化、城镇化快速发展的背景下,土地利用方式更加多样化,区域土地生态问题凸显并逐渐成为研究的热点^[1-2]。土地生态质量研究起因于土地退化及其生态环境恶化,为了防止土地生态环境恶化或土地退化,需要评价土地生态质量并探寻其空间分异规律,了解土地生态系统的生态环境状况,并据此提出可行的预防措施。

目前,土地生态质量研究主要集中在土地的环境影响与评价,而对土地的生态质量评价内容不全、深度不够,忽视了生态系统和生态过程的完整性,并缺乏从生态系统长期、动态角度研究生态建设对土地生态质量演变的影响和规律;此外,由于从土地生态系统的众多生态因子中识别重要的生态组分存在一定难度,使得对土地生态质量评价和空间分异规律缺乏全面、系统的研究。总的来说,虽然关于土地生态质量评价方面的研究已有一些,但是针对市域尺度土地生态质量空间分异的相关研究较少,主要有戴靓^[3]以金坛市为例研究了县域土地生态质量的空間分异及其主控因子识别;昌亭等^[4]研究了金坛市作为长三角经济发达地区的典型地区,得出金坛市土地生态质量分布具有城乡梯度的规律;徐嘉兴^[5]以徐州矿区为例研究了典型平原矿区土地生态演变及评价;张合兵等^[6]以平顶山市为例研究了土地生态质量评价及影响因素,运用 ArcGIS 软件与综合指数法对平顶山市土地生态质量进行评价,并对其影响因素进行分析。吴健生等^[7]以平朔露天矿区为研究对象,采用 ESDA 方法定量研究了矿区生态风险空间分异特征。王大力等^[8]以云南省为研究空间载体,克服突破了生态环境偏重单要素的传统评价方法,筛选构建了区域生态环境综合评价方法,探讨了云南省生态环境及空间分异特征。

总的来说,目前有关土地生态质量空间分异方面的研究,主要集中在土地生态质量评价指标的构建以及评价结果的空间格局分析以及生态环境等方面的空间分异;并且,从研究区域来说,有些从省域进行研究,也有从流域和矿区进行研究,但针对市域尺度的研究还较为少见。此外,虽然有少数研究对土地生态质量空间分异进行了探讨,但无法较为明显地体现其空间分布状况和空间变化规律,尤其缺少识别影响土地生态质量空间分异主控因子的相应方法和模型。因此,迫切需要深入、系统地研究土地

生态质量演变和分异规律,并准确识别土地生态质量分异的主控因子,对于改善区域生态环境,实现土地可持续利用等具有重要的理论意义和实践价值。

本研究基于 GIS 技术,结合焦作市区域特点构建土地生态质量评价指标体系,利用理想点法计算得到焦作市行政村尺度的各准则层和综合层分值,然后通过 ArcGIS 中的热点分析工具对焦作市土地生态质量的空間冷热点分布规律进行研究。在热点分析的基础上,利用控制变量法,用 CART 算法构建分类决策树,确定每个指标对全局土地生态质量的贡献度大小从而识别主控因子。最后用主成分分析法计算出焦作市每个生态类型区土地生态质量的主控因子。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

焦作市位于河南省西北部,地处北纬 35°10′ ~ 35°21′N, 113°4′ ~ 113°26′E 之间,东西长约 32.5 km,南北宽约 19.7 km。焦作市总面积为 4 072 km², 2012 年中心城区建成区面积 110 km²。焦作市辖 4 个市辖区、4 个县、1 个省级高新技术产业开发区,代管 2 个县级市,共有 45 个街道、36 个镇、22 个乡、1891 个行政村。2014 年末,焦作市总人口为 368.49 万人,常住人口为 352.25 万人,城镇化率达到 53.21%。焦作矿产资源品种较多,储量较大,质量较好,经过普查的矿产资源有 40 余种,占河南省已发现矿种 25%,探明储量的有煤炭、石灰石、铝矾土、耐火粘土、硫铁矿等 20 多种。矿产资源开采为焦作社会经济发展做出巨大贡献的同时,也带来了严重的土地破坏和生态环境退化,其中最严重的就是煤炭开采带来的土地资源的破坏,包括塌陷、挖损和压占,这些土地在遭受破坏和退化的过程中,也带来了严重的生态环境问题。

1.2 数据来源

本研究数据来源于焦作市土地利用现状图、空间分辨率为 2.5 m 的 Spot 遥感影像、土壤污染调查数据、基础地理数据、城镇地籍数据、地球化学调查数据、土壤图、地形图、数字模型高程 (DEM) 数据和气象资料,人口数据来自 2014 年《焦作统计年鉴》。

1.3 评价指标体系的构建

土地生态质量评价以生态系统观点为基础,综

合评价分析研究区域内土地资源的自然特性、社会经济发展状况及景观生态状况等因素,从而较为客观地揭示区域土地资源利用和生态状况对区域内社会、经济和环境可持续发展的影响程度和制约因素。评价指标体系的构建作为土地生态质量评价的关键环节,其合理与否将直接影响评价结果的科学性。因此,土地生态质量评价指标体系必须在充分认识土地生态质量评价特点和内涵基础上,借鉴不同评价指标体系的优点并进行有机结合,同时充分考虑不同区域土地生态特点与问题,构建科学合理的土地生态质量评价指标体系,为科学开展土地生态质量评价解决土地生态问题,提供坚实的基础。

现有研究中,土地生态质量评价指标体系构建与评价目的紧密相关,目标不同则指标体系有较大差异。根据评价指标体系差异,可将土地生态质量评价分为面向过程和面向管理两种类型。面向过程的土地生态质量评价,较注重土地自身的自然状况,而忽略了人文指标;面向管理的土地生态质量评价,由于受到数据来源的限制不能全面反映土地本身的

生态状况,较多的注重人类干扰对土地生态的影响,评价精度不高,无法应用于区域精细化管理。因此,为深入了解研究区土地生态状况,遵循指标的可获取性、差异性、综合性及稳定性等指标选取原则,选取土地生态的本底指标和对土地生态有直接影响指标。

综合对比省域尺度、县域及更小尺度下土地生态质量评价指标选取特点,考虑市域尺度上指标选取的要求,本研究将基于样点实测数据、土地利用斑块数据和行政单元尺度数据有效结合,依据土地生态学与土地管理学的基本原理,从反映土地生态系统本身的状态指标和对区域土地生态影响最直接的人为响应指标出发,从生态本底、生态结构、生态效益与生态胁迫 4 个方面,按准则层和指标层构建土地生态评价指标体系。并采用层次分析法确定各指标权重(表 1)。根据评价指标的实测值,使用理想点法计算每个评价单元(行政村)的理想点得分,评价研究区土地生态质量,并将该分值作为新增字段输入到 ArcGIS 图的属性表中,为后面热点分析提供数据支撑。

表 1 土地生态质量评价指标体系
Table 1 Index system of land ecological quality evaluation

准则层 Criteria layer	准则层权重 Criteria layer weight	元指标层 Meta index layer	指标权重 Index weight
生态本底 Ecological background	0.29	年均降水量 Annual precipitation	0.124
		土壤有机质含量 Soil organic matter concentration	0.172
		有效土层厚度 Effective soil thickness	0.166
		坡度 Slope	0.105
		高程 Elevation	0.099
		植被覆盖度 Vegetation coverage	0.165
		NPP	0.169
生态结构 Ecological structure	0.34	类型多样性指数 Type diversity index	0.098
		格局多样性指数 Pattern diversity index	0.087
		斑块多样性指数 Plaque diversity index	0.084
		耕地比例 Proportion of cultivated land	0.093
		林地比例 Proportion of forest land	0.123
		林网密度 Forest density	0.102
		水面比例 Proportion of waters	0.104
		生态基础设施用地比例 Proportion of ecological Infrastructure land	0.107
		城乡建设用地比例 Proportion of urban and rural construction land	0.094
生态效益 Ecological benefits	0.17	生态连通性 Ecological connectivity	0.108
		生态服务价值 Ecological service value	1.000
		土壤综合污染面积比例 Percentage of integrated soil contaminated area	0.278
		土壤综合污染指数 Soil integrated pollution index	0.286
		损毁土地比例 Proportion of damaged land	0.235
生态胁迫 Ecological stress	0.20	人口密度 Population density	0.201

1.4 研究方法

1.4.1 理想点法 TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution) 法又称理想点法,是一种有限方案多目标决策分析方法,“正理想解”和“负理想解”是 TOPSIS 的两个基本概念,即通过设计各指标的正理想解和负理想解,建立评价指标与正理想解与负理想解之间距离的二维数据空间,在此基础上对评价方案与正理想解和负理想解作比较,若最接近于正理想解,同时又最远离负理想解,则该方案是备选方案中的最好方案。其主要计算公式为:

(1) 确定理想解 Z^+ 、负理想解 Z^- , 设 J 代表正向指标集、 J^* 代表负向指标集:

$$Z^+ = (\max_{j \in J} r_{ij}, j \in J; \min_{j \in J^*} r_{ij}, j \in J^*, i = 1, 2, \dots, m) = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+) \quad (1)$$

$$Z^- = (\min_{j \in J} r_{ij}, j \in J; \max_{j \in J^*} r_{ij}, j \in J^*, i = 1, 2, \dots, m) = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-) \quad (2)$$

(2) 计算距离 D^+ 与 D^- :
每个方案到理想解 Z^+ 的距离为:

$$D^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - z_j^+)^2} \quad (3)$$

每个方案到负理想解 Z^- 的距离为:

$$D^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - z_j^-)^2} \quad (4)$$

(3) 计算每个方案对理想解的相对接近度指数 C_i , 计算公式为:

$$C_i = D^- / (D^+ + D^-) \quad (5)$$

C_i 值越大,表明第 i 个评价单元的土地生态质量水平越高,越接近最优水平。

本文利用理想点法对研究区土地生态质量进行评价,得到研究区土地生态质量综合评价结果图,为后面进行土地生态质量空间分异分析和主控因子识别提供基础数据。

1.4.2 热点分析模型 热点分析模型可以用于空间布局分异研究,该模型基于空间计量地理学的空间自相关思想,通过分析各影响因子属性值的“中心”(高值集聚,即热点)和“洼地”(低值集聚,即冷点),从而揭示空间要素或影响因素的集聚程度,其理论原型为空间计量学家 Anselin 于 1995 年提出的空间关联局域指标,主要通过计算局部高/低聚类值 (Getis - OrdG) 来定量判断区域极高或极低值要素的集聚程度或差异^[9]。Getis - OrdG $_i^*$ 表达式为:

$$G_i^* d = \sum_{j=1}^n w_{ij} (d) x_j / \sum_{j=1}^n x_j \quad (6)$$

为了便于解释和比较,对 $G_i^* d$ 进行标准化处理

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}} \quad (7)$$

式中, $E(G_i^*)$ 表示 G_i^* 的数学期望;而 $\text{Var}(G_i^*)$ 表示 G_i^* 的方差, w_{ij} 是空间的权重。若 $Z(G_i^*)$ 为正且显著,则说明位置 i 周边的值相对较高,属于热点区;反之,若 $Z(G_i^*)$ 为负值且显著,则说明位置 i 周围的值相对较低,属于冷点区。已有研究中,一般 x_j 值用的是各冷热点分析指标的属性值。

热点分析工具是 ArcGIS 空间统计工具箱中的一种分析工具,它可对数据集中的每一个要素计算 Getis - OrdG $_i^* d$ 统计。通过得到的 Z 得分和 P 值,分析高值或低值要素在空间上发生聚类的位置。此工具的工作方式为:查看邻近要素环境中的每一个要素,高值要素往往容易引起注意,但可能不是具有显著统计学意义的热点。要成为具有显著统计学意义的热点,要素应具有高值,且被其它同样具有高值的要素所包围。某个要素及其相邻要素的局部总和将与所有要素的总和进行比较;当局部总和与所预期的局部总和有很大差异,以至于无法成为随机产生的结果时,会产生一个具有显著统计学意义的 Z 得分。

本文利用热点分析模型在研究区土地生态质量评价结果的基础上,对焦作市土地生态质量的空间冷热点分布规律进行研究。

1.4.3 决策树模型 决策树 (Decision Tree) 是在已知各种情况发生概率的基础上,通过构建决策树来求取净现值的期望值大于等于零的概率,评价项目风险,判断其可行性的决策分析方法,是直观运用概率分析的一种图解法^[10]。对同一分类目标,使用不同指标构建的决策树其分类精度会有所差异,因此根据控制变量法原理可以测算每个评价指标对分类结果精度的影响,即其贡献度,本研究采用 CART 算法构建分类决策树。

CART 的节点选择准则是使节点的不纯度尽可能小,即使得不纯度尽可能大地下降。而不纯度是一个和纯度相对的概念。度量一个节点的不纯度比度量纯度更有利于分类,所以使用不纯度作为指标。不纯度的度量有多种方法,本研究采用误分类不纯度来进行计算。

误分类不纯度的计算公式为:

$$\text{Imp}(N) = 1 - \max P(w_j) \quad (8)$$

要使得不纯度下降最大,不纯度下降可以使用下式计算:

$$\Delta \text{Imp}(s) = \text{Imp}(N) - \sum_{k=1}^M P_k \text{Imp}(N_k) \quad (9)$$

其中, P_k 是分支到节点 N_k 的训练样本占的比例,且满足 $\sum_{k=1}^m P_k = 1$ 。

本文在热点分析的基础上,基于控制变量法,用

CART 算法构建分类决策树,并根据其分类精度的高低来确定每个指标对研究区全局土地生态质量评价结果的贡献度大小从而识别主控因子。

1.4.4 主成分分析法 主成分分析法是一种降维的统计方法,它借助于正交变换,将其分量相关的原随机向量转化成其分量不相关的新随机向量,然后对多维变量系统进行降维处理,能以一个较高的精度转换成低维变量系统,再通过构造适当的价值函数,进一步把低维系统转化成一维系统^[11]。其具体步骤如下:

- (1) 原始指标数据的标准化。
- (2) 对标准化阵求相关系数矩阵。
- (3) 解样本相关矩阵的特征方程,计算特征根,确定主成分。
- (4) 将标准化后的指标变量转换为主成分。

(5) 对主成分进行综合评价。

对主成分进行加权求和,即得最终评价价值,权数为每个主成分的方差贡献率。

本文采用主成分分析法,在全球土地生态因子贡献度分析的基础上,计算识别出研究区每个生态类型区的主控因子。

2 结果与讨论

2.1 土地生态质量空间分异规律

2.1.1 结果分析 利用 ArcGIS10.0 中的热点分析工具,以焦作市村级行政区为评价单元,将各评价单元的理想点得分分值作为输入字段进行热点分析,根据各评价单元的 Z 值得分可以得到焦作市生态质量空间分异的冷热点图(如图 1)。

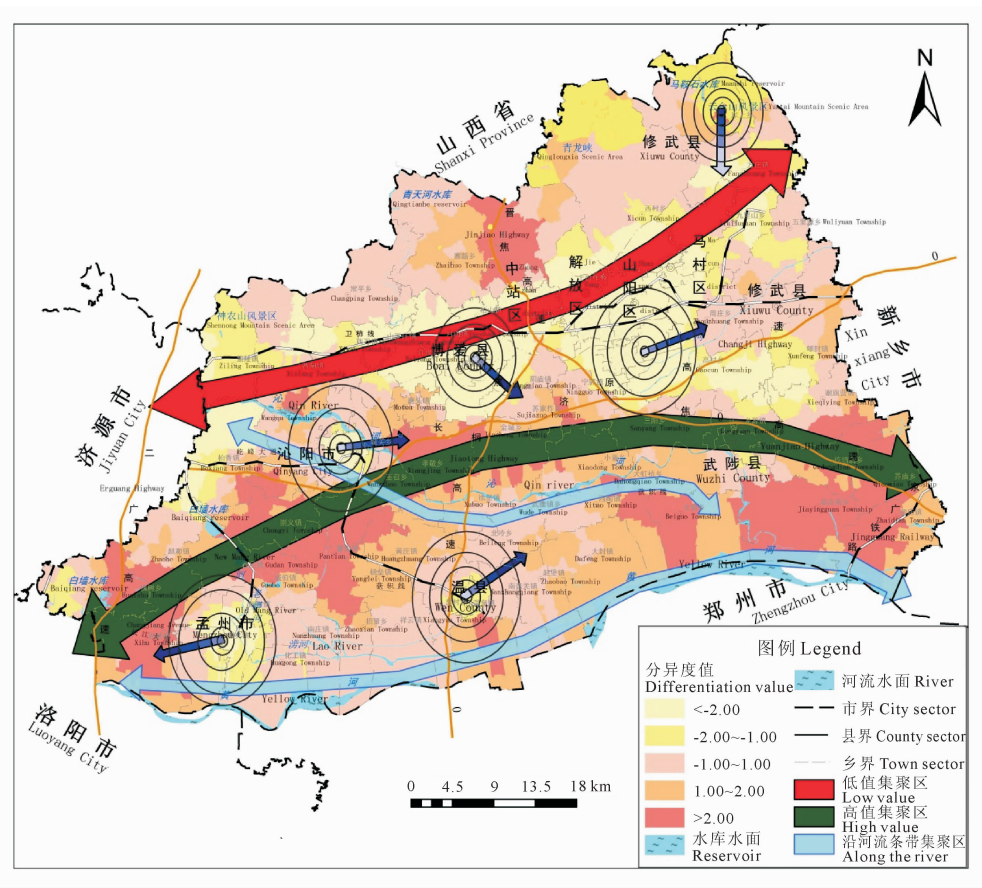


图 1 焦作市土地生态质量空间冷热点分布图

Fig.1 The distribution map of cold/hot spots of land ecological quality in Jiaozuo City

由图 1 分析可知,焦作市土地生态质量空间聚类分异根据冷热点分值由低到高可划分为 5 个类型。Z 值得分小于 -2.0 的为一级生态空间分异类型区, -2.0 到 -1.0 的为二级生态空间分异类型区,以此类推,Z 值得分大于 2.0 的区域为五级生态空间分异类型区。Z 值得分高的区域为热点集聚

区,表明此处生态质量较好,分值低的区域为冷点集聚区,表明此处生态质量较差。以分值最高的区域为五级生态空间分异类型区,即焦作市生态质量最好的区域,分值越低生态等级越低,各级生态空间分异类型区及其对应的冷热点得分如表 2 所示。

表 2 各生态空间分异类型区冷热点分值
Table 2 Cold/hot spot score of each ecological type area

生态类型区分 Ecological type area division	Z 值得分 Z value score	面积/km ² Area	评价单元数(村级行政区) Number of evaluation units (village level)
一级生态空间分异类型区 First level of ecological spatial differentiation type area	< -2.0	656.07	358
二级生态空间分异类型区 Second level of ecological spatial differentiation type area	-2.0 ~ -1.0	334.99	170
三级生态空间分异类型区 Third level of ecological spatial differentiation type area	-1.0 ~ 1.0	1352.10	629
四级生态空间分异类型区 Fourth level of ecological spatial differentiation type area	1.0 ~ 2.0	908.83	385
五级生态空间分异类型区 Fifth level of ecological spatial differentiation type area	> 2.0	721.26	348

从图 1 可以看出,焦作市土地生态质量分异特征表现在以下几个方面:

(1) 总体来看,焦作市土地生态质量空间分异大致呈现出“核心—边缘”结构。即土地生态质量由城镇中心向远郊呈上升趋势,同时,其空间分异度值从 -2.0 升到 2.0,而土地生态质量由水库、河流、风景区向城区方向呈下降趋势,同时,其空间分异度值从 2.0 降到 -2.0。

(2) 研究区土地生态质量空间分异呈现城区周边土地生态质量显著低值集聚,外围远郊各村及水库河流区域的土地生态质量空间分异呈显著高值集聚特征。焦作市市辖区(包括山阳区、中站区、解放区、马村区)、博爱县、沁阳市、孟州市、温县等城区周边的土地生态质量空间分异呈现显著低值集聚(分异度值低至 -1.0 以下),以该区域为中心向外围延伸的区域,其土地生态质量呈上升趋势;修武县、武陟县两县植被覆盖率较高,旅游产业比较发达,更注重对生态的保护和建设,城区生态指数高于其它城区(分异度值介于 -1.0 和 1.0 之间)。

(3) 研究区局部区域土地生态质量空间分异呈现面状或条带状聚集特征。如马村区九里山乡辖区分布有众多煤矿,因煤炭开采引起地表沉陷,对土地生态造成一定的破坏,表现为低值集聚区(分异度值低至 -1.0 以下);高值集聚的区域则多为水库、旅游景点、渠、河流等所在地,青天河水库、白墙水库,群英水库等水库,云台山风景区、神农山风景区、青天河风景区等旅游景点因要素聚集程度高(分异度值普遍达到 1.0 以上),呈面状分布聚集特征;人民胜利渠、黄河、沁河、大沙河等河流水渠,郑焦晋高速、长济高速、焦克路、新济路、焦枝铁路等道路沿线两侧表现为高聚集区,沿道路或河流走向呈现条带

状分布。

2.1.2 讨论 从上述结果来看,研究区土地生态质量大致呈现出“核心—边缘”结构,即由城镇中心向远郊土地生态质量呈上升趋势,而由水库、河流、风景区向城区方向土地生态质量呈下降趋势。主城区附近片区土地生态指数显著低值集聚,而外围远郊各村及水库河流区域的土地生态指数则呈显著高值集聚。这一空间分异现象与空间经济学或新经济地理学所证实的,由于规模报酬递增与交易成本所导致的区域发展过程中自生演化的城乡二元“核心—边缘”结构^[12]相契合。

2.2 全局土地生态主控因子

2.2.1 结果分析 识别全局土地生态主控因子其实就是分析研究区土地生态质量评价因子对评价结果的贡献度。

测算指标贡献度的方法有很多,如控制变量法^[13]、局部变化率与全部变化率比较法^[14]、变量分离法^[15]、决策树法^[16]等。但前三种方法都只能对数值型变量进行计算和解释,而类型变量无法衡量;且变化比率法需要两期数据进行比较计算。决策树可以评价各数值变量或者类型变量对土地生态质量评价结果的相对重要性,但是不能给出绝对贡献率的定量评价。在综合比较现有因子贡献度测算方法优缺点的基础上,本研究选用基于 CART 算法的决策树方法,对研究区土地生态质量评价时选取的 22 个生态因子的贡献度进行分析。通过控制变量法,每次剔除不同的变量,可以得到不同的决策法则和训练精度,而通过训练精度的大小比较,可以实现每个变量贡献度大小的排序。

以此原理为基础,在 SPSS 19.0 软件中,将土地生态质量评价结果作为因变量,22 个指标变量作为

自变量输入。通过控制变量法和 CART 中的训练精度比对分析,实现各生态因子对研究区全局土地生态质量评价结果的贡献率评价,结果见表 3。

2.2.2 讨论 从上述结果可以看出,研究区全局土地生态主控因子呈现以下特点:

(1) 各棵树的节点数和树深相差较小,节点数相差不超过 5 且节点数分布在 35 – 40 之间,树深相差不超过 3 且分布在 9 – 12 之间,说明各分类模拟规则的复杂程度差别不大。

(2) 生态服务价值是造成焦作市土地生态质量差异的主要原因。在所有指标作为自变量输入条件下,CART 模拟精度为 91.2%,当分别剔除自变量有效土层厚度、生态连通性、耕地比例、土壤综合污染指数、年降水量、高程、损毁土地比例、城乡建设用地比例时,CART 的训练精度全部为 91.0%。与不剔除自变量情况下的训练精度相比,降低了 0.2 个百分点,降幅很小,表明这 8 个变量对焦作市土地生态质量空间分异的贡献不大。当剔除生态服务价值时,训练精度降低 6.2%,表明生态服务价值是影响

土地生态质量的主要原因。这 22 个生态因子对于焦作市生态质量贡献度从大到小依次为:生态服务价值、NPP、土壤综合污染面积比例、人口密度、林网密度、水面比例、林网密度、生态基础设施用地比例、类型多样性指数、格局多样性指数、斑块多样性指数、植被覆盖度、林地比例、土壤有机质、坡度、有效土层厚度、生态连通性、耕地比例、土壤综合污染指数、年降水量、高程、损毁土地比例时、城乡建设用地比例。

2.3 各生态类型区主控因子

2.3.1 结果分析 通过上述研究可知,焦作市按其土地生态质量可以划分为五级生态类型区,从一级到五级生态质量递增。由于每个生态类型区所处的空间位置不同,影响其土地生态质量的主要因子也必然会有所差异,本研究使用 SPSS 19.0 软件的主成分分析功能,将所有评价指标作为输入变量,分别对各级生态类型区进行主成分分析,得到各土地生态类型区的主控因子(如表 4)。

表 3 控制变量下的 CART 模拟精度
Table 3 Simulation accuracy of different independent variables in CART

变量 Variable	CART 训练精度 / % Training accuracy	节点数 Number of nodes	树深 Tree deep
全部 All	91.2	38	11
年均降水量 Annual precipitation	91.0	38	11
土壤有机质含量 Soil organic matter concentration	90.8	39	10
有效土层厚度 Effective soil thickness	91.0	38	11
坡度 Slope	90.8	39	11
高程 Elevation	91.0	38	11
植被覆盖度 Vegetation coverage	90.4	36	11
NPP	87.5	40	9
类型多样性指数 Type diversity index	90.2	37	11
格局多样性指数 Pattern diversity index	90.2	38	10
斑块多样性指数 Plaque diversity index	90.2	39	11
生态连通性 Ecological connectivity	91.0	38	11
耕地比例 Proportion of cultivated land	91.0	38	11
林地比例 Proportion of forest land	90.5	38	11
水面比例 Proportion of waters	89.4	37	12
生态基础设施用地比例 Proportion of ecological infrastructure land	89.8	36	11
城乡建设用地比例 Proportion of urban and rural construction land	91.0	38	11
林网密度 Forest density	89.5	38	11
土壤综合污染指数 Soil integrated pollution index	91.0	38	11
生态服务价值 Ecological service value	85.0	35	10
土壤综合污染面积比例 Percentage of integrated soil contaminated area	88.1	40	12
人口密度 Population density	88.9	39	11
损毁土地比例 Proportion of damaged land	91.0	38	11

表 4 各生态类型区主控因子
Table 4 Key controlling factors of different ecotypes

区域划分 Regional division	主控因子 Master factors
一级生态空间分异类型区 First level of ecological spatial differentiation type area	年均降水量 Annual precipitation;耕地比例 Proportion of cultivated land;生态基础设施用地比例 Proportion of ecological infrastructure land;生态服务价值 Ecological service value
二级生态空间分异类型区 Second level of ecological spatial differentiation type area	耕地比例 Proportion of cultivated land;土壤有机质 Soil organic matter content;林网密度 Forest density;格局多样性指数 Pattern diversity index;损毁土地比例 Proportion of damaged land
三级生态空间分异类型区 Third level of ecological spatial differentiation type area	耕地比例 Proportion of cultivated land;生态连通性 Ecological connectivity;土壤综合污染面积比例 Soil integrated pollution index;水面比例 Proportion of waters;林网密度 Forest density;植被覆盖度 Vegetation coverage;损毁土地比例 Proportion of damaged land
四级生态空间分异类型区 Fourth level of ecological spatial differentiation type area	类型多样性指数 Type diversity index;坡度 Slope;水面比例 Proportion of waters;年均降水量 Annual precipitation;格局多样性指数 Pattern diversity index;城乡建设用地比例 Proportion of urban and rural construction land
五级生态空间分异类型区 Fifth level of ecological spatial differentiation type area	NPP;水面比例 Proportion of waters;生态连通性 Ecological connectivity;格局多样性指数 Pattern diversity index;年均降水量 Annual precipitation;损毁土地比例 Proportion of damaged land

2.3.2 讨论 由上述结果可以看出,研究区各生态空间分异类型区主控因子分别为:

(1) 一级生态空间分异类型区:主控因子为年均降水量、坡度、生态基础设施用地比例、生态服务价值。

(2) 二级生态空间分异类型区:耕地比例、土壤有机质、林网密度、格局多样性指数、损毁土地比例对土地生态质量影响较大,一级和二级生态空间分异类型区主要分布在城市扩张发展区。该区域已基本实现城市化,区内人类活动越来越频繁,土地利用结构失衡的现象不断出现,从而引起生态用地减少、土壤沙化与土壤肥力下降等生态问题。

(3) 三级生态空间分异类型区:主控因子最多,包括耕地比例、生态连通性、土壤综合污染面积比例、水面比例、林网密度、植被覆盖度、损毁土地比例等因子,影响机理复杂,受自然条件和人为活动双重影响突出。

(4) 四级生态空间分异类型区:受类型多样性指数、耕地比例、水面比例、年均降水量、格局多样性指数、城乡建设用地比例的影响。

(5) 五级生态空间分异类型区:主控因子为 NPP、水面比例、生态连通性、格局多样性指数、年均降水量、损毁土地比例,该区域内城镇化水平较低,植被覆盖度较好,具有生态功能的林地、草地面积比例较大,使整个区域内的土地生态质量处于一个较高的水平。四级和五级生态空间分异类型区大部分面积处于生态保护区范围内,林地面积大,且受人为活动影响较小,因此其主控因子以自然因素为主。

3 结 论

本文首先利用理想点法对研究区土地生态质量

进行评价,在评价结果的基础上利用热点分析模型分析土地生态质量空间分异规律;然后利用决策树模型确定每个指标对全局土地生态质量评价结果的贡献度大小;最后用主成分分析法识别出研究区每个生态类型区土地生态质量的主控因子。主要结论有:(1) 研究区土地生态质量划分为五个等级,从一级到五级生态质量递增。总体来看,研究区土地生态质量大致呈现出“核心—边缘”结构,即由城镇中心向远郊土地生态质量呈上升趋势,而由水库、河流、风景区向城区方向土地生态质量呈下降趋势。(2) 研究区全局土地生态质量贡献度分析结果表明,生态服务价值对土地生态质量的贡献度最大。(3) 研究区不同生态类型区的主控因子各有差异,其中一二级生态区受人为因素影响较大,三级生态区受自然条件和人为活动双重影响,主控因子最多,而四五级生态区受人为活动影响较小,其主控因子以自然因素为主。

参 考 文 献:

[1] 戴 靓,姚新春,周生路,等.长三角经济发达区金坛市土地生态状况评价[J].农业工程学报,2013,29(8):249-257.
[2] 刘焱序,李春越,任志远,等.基于 LUCC 的生态型城市土地生态敏感性评价[J].水土保持研究,2012,19(4):125-130.
[3] 戴 靓.县域土地生态质量的空间分异及其主控因子识别——以金坛市为例[D].南京:南京大学,2013.
[4] 昌 亭,周生路,戴 靓,等.金坛市土地生态质量的城乡梯度规律研究[J].水土保持研究,2014,21(3):130-135.
[5] 徐嘉兴.典型平原矿区土地生态演变及评价研究——以徐州矿区为例[D].徐州:中国矿业大学,2013.
[6] 张合兵,陈宁丽,孙江锋,等.基于 GIS 的土地生态质量评价及影响因素分析——以平顶山市为例[J].河南农业科学,2015,44(1):62-69.

