

基于 ANP-GIS 的长春市城市建设用地生态适宜性评价

王宪恩, 丁炎军, 王 硕

(吉林大学 地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130021)

摘 要: 基于城市建设用地的生态适宜性对建设用地资源进行合理有效开发利用是缓解城市化进程与土地资源有限性矛盾的根本途径。因此,在前人研究的基础上,提出了结合网络分析法(Alytic Network Process, ANP)与 GIS 的城市建设用地生态适宜性耦合评价模型,并结合长春市的自然、社会和经济特点对长春市城市建设用地生态适宜性进行案例研究,最终获得了可视化的长春市城市建设用地生态适宜性空间分布图(5 个适宜度)。结果表明:对于长春市建设用地的选取最适宜的土地面积约为 1 289.3 km²,适宜区域 6 662.7 km²,较适宜区域 9 461.4 km²,一般适宜区域 2 848.2 km²,不适宜区域 303.4 km²,而且长春市建设用地生态适宜性较高的地区(最适宜区域和适宜区域)分布在长春区域的腹地,处于长春市市区以及九台区、德惠市、农安县的交汇的区域,该地区自然、社会和经济各项指标的生态适宜性度均相对较高,表明长春市未来的城市发展以及城市建设的重点可以向生态适宜度较高的中部地区偏移。研究结果说明了 ANP-GIS 耦合模型的可靠性,同时也为长春市的建筑用地的选取和长春市的城市规划提供决策依据。

关键词: 城市建设用地; 生态适宜性; 网络分析法; GIS; 长春

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0232-05

Evaluation of Ecological Suitability of Urban Construction Land in Changchun City Based on ANP-GIS

WANG Xianen, DING Yanjun, WANG Shuo

(Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education,
College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Ecological suitability of the urban construction land is the fundamental way to alleviate the contradiction between the urbanization process and the land resources. According to the previous research, Analytic Network Process (ANP)-GIS integrated model was adopted to build up the ecological suitability evaluation of urban construction land in Changchun, combined with Changchun City's natural, social, and economic characteristics. Finally, a visualized spatial distribution map (five suitability degrees) of ecological suitability of Changchun urban construction land was obtained. From the ecological suitability map, it can be seen that the most suitable land area for the construction land selection in Changchun is approximately 1 289.3 km², the suitable area is 6 662.7 km², the more suitable area is 9 461.4 km², and the general suitable area is 2 848.2 km², an unsuitable area 303.4 km². The areas with high ecological suitability (the most suitable area and suitable area) for construction land in Changchun City are located in the hinterland of the Changchun region, where the degree of ecological suitability of natural, social, and economic indicators is relatively high. It indicates that the city's future urban development and urban construction priorities can shift to the central region where ecological fitness is relatively high. The results showed that the reliability of ANP-GIS coupling model and provides the decision-making basis for Changchun's construction land selection and Changchun city planning.

Keywords: urban construction land; ecological suitability; analysis network process; GIS; Changchun City

近年来,随着中国经济的稳步快速发展,高速的城市化进程与土地资源有限性的矛盾不断加剧,如何合理规划城市的建设用地资源,发挥建设用地的最大效益已经成为我国城市土地利用的重要任务^[1]。由于城市均

处于一定质量下的生态环境中,其形成和发展都受到生态系统和环境容量的支撑与约束^[2],城市建设用地的土地生态适宜性评价可以为协调城市扩张与土地资源有限性之间的矛盾提供合理的决策依据,其本质上是生

态保护和城市土地的可持续利用的角度出发,在考虑土地固有的生态条件的基础上,综合社会以及经济因素,定量分析不同土地利用类型的适宜程度,引导人们按照土地的内在适宜程度进行开发,对于提高城市土地资源的社会经济生态价值、保证城市土地资源合理利用具有重要的指导意义^[3-4]。

基于此,如何对城市建设用地进行量化的生态适宜性评价分析成为生态适宜性研究中的重点工作。1969 年 McHarg 在对里士满林园大路的选线方案的研究中首次提出土地生态适宜性分析的概念之后,采用“千层饼”叠图法得到里士满园林大路的最适宜建设方案,这种被称为 McHarg 法的研究方法得到广泛的关注^[5]。但是,传统的 McHarg 方法对评价中各指标采用等权处理的方法并不符合土地利用的实际情况。因此,随着研究的不断深入,Bagheri 等人在 McHarg 法基础上采用层次分析法修正了传统 McHarg 法评价指标等权设置的缺陷并对马来西亚登嘉楼地区进行了生态适宜性研究^[6];Fan 等人则从克服传统方法中各指标简单的赋权相加与实际情况的差异出发,将物理学的动力阻力模型与层级分析法结合起来对中国德阳地区进行了土地生态适宜性研究^[7];Xu 等考虑到层次分析法受主观意见影响较大,提出用主成分分析法代替层次分析法进行指标的权重确定,并在此基础上对南京中山风景区的土地适宜性进行评价研究^[8]。随着计算科学与空间技术的进步,传统 McHarg 法与 3S 技术及人工智能算法、演进算法等的结合更加紧密,一方面避免了赋权过程中的主观化影响,另一方面简化了评价的计算方法,例如:Ahmadi 采用神经网络方法作为伊朗马赞德兰省农作物用地生态适宜性评价方法,结果显示该方法评价结果与实际情况的吻合程度高达 83%^[9];Kong 等采用 BP 神经网络对杭州市城乡结合部的农业用地生态适宜性进行了考察,结果显示目前有 52% 左右的土地适于作为农业用地,与杭州市当前的情况接近^[10]。但是无论人工智能算法或演进算法都需要大量的数据作为支撑,这限制了这种计算方法的广泛应用。因此,有学者借鉴层次分析的简便性与神经网络模型的指标间广泛联系特征,将网络分析法(ANP)引入土地生态适宜性分析中,例如:Ferretti 等人考虑到环境问题的复杂性,评价指标之间存在内部联系,提出基于网络分析法和有序加权平均法的多重空间决策支持系统并对意大利皮尔蒙特地区进行土地生态适宜性研究^[11]。Azizi 等采用 DEMATEL 模型构建伊朗阿尔达比勒省风电建设用地区评价指标之间的关系,并在此基础上采用 ANP 方法确定了各指标的权重,从而实现了风电选址的研究^[12]。Malmir 等

则采用 ANP 方法对伊朗阿瓦兹县城市发展用地的生态适宜性进行评价,结果显示 ANP 方法在城市发展用地上具有良好的适用性^[13]。

考虑到城市是由社会、经济和自然 3 个子系统组成的复合生态系统^[14],而且 3 个子系统之间具有内在联系,因此,网络分析法可以较好地表达指标间这种内在联系对于权重确定的影响,同时本文从生态、环境与社会经济角度出发提出了城市建设用地生态适宜性评价的指标体系。并结合该评价体系,运用网络分析法(ANP)和 GIS 耦合的分析方法,综合考虑社会、经济和自然指标对长春市建筑用地进行土地生态适宜性研究,以期能够定量的分析长春市建设用地的生态适宜性,为长春市的城市规划提供有价值的决策依据。

1 方法

本文从城市建设用地的自然属性与社会、经济属性出发,综合考虑自然、社会和经济因素是否符合城市建设发展条件,确立相应的指示指标,并由各指标构成评价指标体系,采用网络分析法计算各指标的权重,采用 GIS 空间分析能力构建各指标图层。在此基础上,将指标图层与网络分析法确定的指标权重在地理信息系统中进行加权叠加,从而获得城市建设用地的生态适宜性评价结果。网络分析法(ANP)是 1996 年 T. L. Saaty 基于层次分析法(AHP)提出的一种适用于非独立的递阶层次结构的决策方法^[15-17]。ANP 是一种决策过程,它提供了一种基于决策者的判断的表示决策因素测度的基本方法,这种方法依靠决策者的判断,采用相对标度形式对决策因素进行两两对比,最终计算矩阵得到元素相对于决策目标的权重^[18-20]。ANP 规避了 AHP 方法在使用时必须假设同一层次的元素相当独立的不足,它以网络形式表示各指标之间的联系,允许指标之间的内在反馈关系,可以更好的解决各种复杂的问题^[21-22]。

运用 ANP 法计算指标权重的过程如下:

(1) 建立 ANP 结构模型。根据决策目标和决策因素确定控制层和网络层,在目标和决策因素的基础上确定各因素之间的相关性(见图 1)。

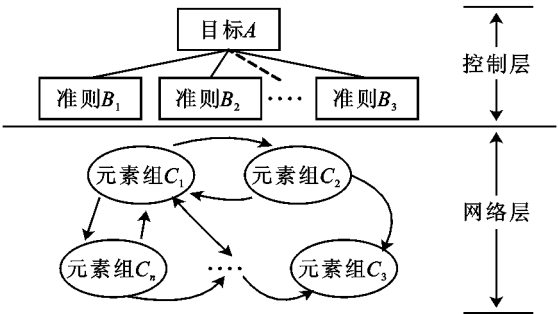


图 1 ANP 模型

(2) 运用网络分析法 (ANP) 基本原理构建初始矩阵。依靠决策者的判断结合 Saaty 的基本比例标度,以控制层 B_i 为准则,以 C_j 中的元素 e_{j1} 为次级准则, C_i 中的其他元素 e_m 相对于 e_{j1} 的重要程度进行比较构建初始矩阵:

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

(1)

计算其特征向量 $W_{i1}^{j1}=(w_{i1},w_{i2}\cdots w_{in})^T$

(3) 根据各指标之间的次级准则建立基于 ANP 网络的超级矩阵。

$$W_{ij}=\begin{bmatrix} W_{i1}^{j1} & \cdots & W_{i1}^{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{im}^{j1} & \cdots & W_{im}^{jn} \end{bmatrix}$$

(2)

矩阵表示层次内部各因子对某个准则的排序。

(4) 构建加权超矩阵。在矩阵 (2) 的基础上考虑层次之间的影响,将每个层次作为一个元素进行两两对比,构建加权超矩阵:

$$W=B_{ij}\times W_{ij}$$

(3)

式中: B_{ij} 表示第 i 个层次相对于第 j 个层次的影响权值。

(5) 计算加权超矩阵 W 得到指标的权重。

2 案例研究

2.1 研究区概况

长春市位于吉林省中部,北纬 $43^{\circ}05'$ — $45^{\circ}15'$,东经

$124^{\circ}18'$ — $127^{\circ}05'$,地处松辽平原腹地。全市下辖 7 个区、1 个县,代管 2 个县级市(南关区、朝阳区、宽城区、二道区、绿园区、双阳区、九台区、榆树市、德惠市、农安县),总面积 $20\,565\text{ km}^2$,其中市区面积 $7\,557\text{ km}^2$ 。长春市 2014 年总人口数量为 754.5 万人,其中市区人口 3 665.9 万人,其他地区人口为 388.7 万人。2014 年来长春市国民经济持续平稳增长,综合实力明显增强,全年实现国内生产总值 5 342.4 亿元,年平均增长 6.6%。

2.2 指标的选取

综合考虑长春市的社会、经济和自然因素,参考前人的研究成果^[1,4,18],考虑地理条件是否允许、景观条件是否宜居、环境条件是否允许、交通是否便利、经济基础是否可以支撑及产业结构是否符合城市建设发展条件,选取城市建设用地生态适宜性评价指标。其中自然因素主要包括景观要素和地形条件等,社会因素主要包括人口密度和交通条件等,经济因素包括地区生产总值和第二产业增加值。这些因素互相联系、互相作用,共同影响决定了长春市土地作为建设用地的生态适宜性程度,表 1 显示了各评价指标的来源和指标的意义。

2.3 权重计算

由于相关因素和评价指标之间以及各自内部存在相互作用的影响,本文选取网络分析法,构建各指标之间复杂关系的网络,由 ANP 法建立的评价指标的结构化网络模型。

表 1 评价指标

指标	指标意义
河流距离	该指标考虑河流对建设用地选取的影响,其表示距离河流的远近,距离越近的地方越适宜建设用地的选取
湖泊距离	该指标考虑湖泊对建设用地选取的影响,其表示距离湖泊的远近,距离越近的地方越适宜建设用地的选取
坡度	该指标考虑地形坡度对建设用地选取的影响,坡度越小越适宜建设用地的选取
海拔	该指标考虑地区海拔对建设用地选取的影响,考虑到长春市的平均海拔,海拔越接近平均值越适宜建设用地的选取
人口密度	该指标考虑人口密度对建设用地选取的影响,人口密度越大越适宜建设用地的选取
公路距离	该指标考虑公路对建设用地选取的影响,其表示距离公路的远近,距离公路越近的地方越适宜建设用地的选取
铁路距离	该指标考虑铁路对建设用地选取的影响,其表示距离铁路的远近,距离铁路越近的地方越适宜建设用地的选取
地区生产总值	该指标考虑 GDP 对建设用地选取的影响,GDP 越大的地区越适宜建设用地的选取
第二产业增加值	该指标考虑地区内工业和建筑业对建设用地选取的影响,二产增加值越大的地区越适宜建设用地的选取

为了计算各评价指标的权重,研究运用层次分析法中的成对比较法确定指标之间的重要程度,比较原则采用 Saaty 的基本比例标度来判断其相对权重。根据 ANP 网络分析法原理,在指标成对比较是分为两个层次:首先是指标集之间的比较;其次为各指标之间基于网络关系的比较。本文研究运用 Super Decisions 软件对评价指标的权重进行计算,软件最终输出的“限制矩阵”得到评价指标相对于生态适宜性的权重大小,表 2 为基于 ANP 法运用 Super Decisions 软件计算的评价指标权重。权重结果显示地区的第二产业增加值对建设用地土地生态适宜性的影

响最大(20.3%),其次为到公路的距离和 GDP 以及到河流的距离,而且总体来看经济因素对建筑用地的生态适宜性影响较大。

2.4 单因子评价结果

对长春市的河流、湖泊、坡度、海拔等数据与社会经济因素数据进行采集,并运用 min-max 标准化方法对评价指标数据进行归一化处理,将指标数据转化为无量纲。以处理结果的变化范围为依据,输入地理信息系统中,运用 GIS 空间分析能力,采用重分类的方法,将其分为 5 类(最适宜、适宜、较适宜、一般适宜、不适宜),结果见附图 10。

长春市的河流水系分布较为均匀,整个市域范围内除西部区域河流较少外,基本覆盖了全市区域;而湖泊分布则主要集中在南部、西部与东部,北部湖泊较少;而高程与坡度而言,东部与南部坡度与高程较大,其他地区的高程与坡度较小,地势平坦;而在人口密度分布上体现出典型的同心圆特征,现有城市用地的人口密度较大,其他地区的人口密度较小;公路分布上可以看到整个市域范围内公路网比较发达,大多数地区均在公路覆盖范围内;而在铁路范围内可以看到主要在城市的南北走向与东西走向上,而在城市东北与西部地区,铁路覆盖较少;而在 GDP 分布上,南部双阳地区与北部榆树地区以北的 GDP 较低;第二产业占比上以南部双阳区、北部榆树市的第二产业占比较低。

表 2 评价指标权重

指标集	评价指标	权重
自然因素	河流距离	0.123
	湖泊距离	0.048
	坡度	0.093
	海拔	0.034
社会因素	人口密度	0.056
	公路距离	0.193
	铁路距离	0.083
经济因素	地区生产总值	0.165
	第二产业增加值	0.203

2.5 结果分析

在 ANP 法计算的指标权重的基础上运用 GIS 的加权叠图能力进行所有指标图层的叠加,最终得到长春市建筑用地的生态适宜性地图,见附图 11。可以看出,土地适宜性地图将长春市的土地的生态适宜性分成 5 个等级(最适宜、适宜、较适宜、一般适宜、不适宜),其最适宜性的土地面积约为 1 289.3 km²,适宜区域 6 662.7 km²,较适宜区域 9 461.4 km²,一般适宜区域 2 848.2 km²,不适宜区域 303.4 km²,在城市建设用地的选取时可以优先考虑最适宜的地区,其次考虑适宜性地区,而较适宜、一般适宜和不适宜地区会由于各种自然、经济、社会因素的不适宜性,不适宜城市的建设。其中最适宜地区位于长春市区北部与整个市域的中东部,为长春市北部与九台市辖区,适宜地区主要分布在长春市域范围的中部,主要范围为德惠市,而位于西部的农安县、榆树市主要为较适宜地区,而双阳区与榆树市北部、农安县西部为主要的城市建设用地不适宜地区。

3 讨论

综合分析建设用地生态适宜性分析的单因子状况与最终的分析结果,可以看到,长春市域内长春市市区周边为最适宜地区,首先其处于长春市的中部地

区,坡度平缓、高程较低对于城市建设用地在地理条件上极为适宜,而且所在区域处于伊通河水系和饮马河水系,其距离河流水系的距离及距离湖泊的距离较为适宜,在交通方面,长春北部地区位于哈大铁路与哈大高速的区域,其交通条件适合建设用地的选取,而且地处市区周围,处于经济较为发达地区,而 GDP 与第二产业占比情况适宜于城市建设用地的选取;随着远离市区的地区其适宜性程度逐渐降低,首先其经济稍微落后于市区周边,而且长春市域的北部及东北部地势逐渐增高,海拔以及坡度条件越来越不利建设用地的选取,以至于长春市域的北部及东北部区域为较适宜地区甚至为不适宜地区。

九台区中东部地区即城区周边为最适宜地区,所在区域坡度平缓、高程较低,处于伊通河水系和饮马河水系,而且该区域位于吉林省东西走向铁路及公路覆盖区域,处于经济较为发达地区,GDP 与第二产业占比情况适宜于城市建设用地的选取,虽然人口密度适宜性较为适中,但人口密度的权重较小,因此对城市建设用地生态适宜性影响较小,总体来说其 9 类因子的状况都是极为适宜;而且随着远离市区其适宜性程度逐渐降低,远离市区其经济条件稍微落后,而且九台区的东北部地势偏高,其海拔和坡度逐渐不利于城市建设用地的选取,而且远离铁路和公路的覆盖区域,其交通条件不利,从而随着远离市区其建设用地生态适宜性程度从最适宜地区逐渐变为较适宜地区甚至不适宜地区。

德惠市域中西部地区坡度平缓、高程较低对于城市建设用地在地理条件上极为适宜,而且所在区域处于伊通河水系和饮马河水系,其距离河流水系的距离及距离湖泊的距离较为适宜,地区位于哈大铁路与哈大高速的区域,其交通条件适合建设用地的选取,但其经济条件较长春市和九台区较为落后,综合比较,该地区建设用地生态适宜性为较适宜地区;而德惠市的东部地区地势增高,其坡度和海拔逐渐不利于建设用地的选取,而且远离铁路和公路的覆盖区域,其交通条件不利,同时经济条件相对落后,其生态适宜性条件逐渐变低。

农安县域内县城周围以及靠近长春市的东北部地区其坡度平缓、高程较低对于城市建设用地在地理条件上极为适宜,而且所在区域处于伊通河水系,其距离河流水系的距离及距离湖泊的距离较为适宜,地区位于长白铁路与珥乌高速的区域,其交通条件适合建设用地的选取,但其经济条件较长春市和九台区较为落后,综合比较,该地区建设用地生态适宜性为较适宜地区;而农安县的西部及西北部地区地势增高,其坡度和海拔逐渐不利于建设用地的选取,而且其水资源条件较差,其距离河流水系的距离及距离湖泊的

距离较差,同时远离铁路和公路的覆盖区域,其交通条件不利,另外其经济条件相对落后,其生态适宜性条件逐渐变低。

榆树市域内市区附近坡度平缓、高程较低对于城市建设用地在地理条件上极为适宜,而且所在区域处于松花江水系,其距离河流水系的距离及距离湖泊的距离较为适宜,地区位于榆舒铁路与京哈高速的区域,其交通条件适合建设用地的选取,但其经济条件较长春市和九台区较为落后,综合比较,该地区建设用地生态适宜性为较适宜地区;而榆树市北部地区以及东部地区地势增高,其坡度和海拔逐渐不利于建设用地的选取,同时远离铁路和公路的覆盖区域,其交通条件不利,而且远离市区其经济条件较为落后,总体来看其建设用地的生态适宜性逐渐降低,而且在榆树市北都地区和东部地区逐渐变为不适和地区。

综上所述,对于生态适宜性较适宜地区,长春市域远离市区的周边区域、九台区的中西部、双阳区北部、德惠市域西部、农安县城东南部、榆树市市区周边以及西南部,其主要限制因素为经济的发展以及交通条件,随着社会经济的发展和铁路和公路的延伸,该部分区域的城市建设用地生态适宜性将逐步提高;而对于受自然条件高程以及坡度约束的区域,双阳区的南部、农安县城的西部和东北部、九台区东南部、德惠市东部以及榆树市的西部和北部区域,则不适宜作为城市建设用地的开发,而应该考虑其他更为合适的开发利用方式。

4 结论

城市建设用地的生态适宜性评价是为了协调城市扩展与生态保护之间的矛盾,为了解决这一矛盾,本文提出基于 ANP-GIS 的土地生态适宜性评价方法,城市建设用地的土地生态适宜性评价,综合考虑城市自然、经济和社会因素对城市建设用地的影响,构建城市的生态适宜性地图可以为城市规划和促进城市的健康可持续发展提出新的决策依据。研究结合长春市的自然、经济和社会因素对长春市的建筑用地的土地生态适宜性进行评价分析,评价结构表明建筑用地生态适宜性高的地区分布在城市经济中心,符合长春市建设主体对于建设用地的经济效益的考虑,而且最终的生态适宜性地图可以为长春市的城市规划提供新的思路。

本文提出基于 ANP-GIS 的土地生态适宜性评价方法,该方法用网络分析法代替常用的层次分析法,克服层次分析法不能处理复杂网络关系的不足,能更好的用于处理复杂的环境问题。而且在长春市建设用地的案例研究中证实 ANP-GIS 在处理复杂的环境问题的能力,网络分析法和 GIS 的结合为处理复杂的环境问题提供新的思路。

但是由于本文基础数据分辨率较低,难以进行更小空间尺度的分析,笔者将在获取分辨率更高数据的基础上,开展更为细致的长春市土地生态适宜性评价研究。

参考文献:

- [1] 陆张维,徐丽华. 基于 GIS 的中心城区建设用地适宜性评价:以浙江省杭州市为例[J]. 江苏农业科学,2016,44(6):488-492.
- [2] Kim D S, Mizuno K, Kobayashi S. Analysis of urbanization characteristics causing farmland loss in a rapid growth area using GIS and RS[J]. Paddy & Water Environment, 2003,1(4):189-199.
- [3] 杨子生. 论土地生态规划设计[J]. 云南大学学报:自然科学版,2002,24(2):114-124.
- [4] 张浩,赵智杰, ZHANG Hao, 等. 基于 GIS 的城市用地生态适宜性评价研究:综合生态足迹分析与生态系统服务[J]. 北京大学学报:自然科学版,2011,47(3):531-538.
- [5] Mcharg I L. Design with nature[M]. New York: American Museum of Natural History, 1969.
- [6] Bagheri M, Azmin W N. Application of GIS and AHP technique for land-use suitability analysis on coastal area in terengganu[R]//World Automation Congress(Wac),2010.
- [7] Fan C J, Shen S G, Wang S H, et al. Research on urban land ecological suitability evaluation based on gravity resistance model: A case of deyang city in China[J]. Procedia Engineering, 2011,21(1):676-685.
- [8] Xu Y. Application of GIS spatial analysis method in landscape planning and design: A case study of integrated land-use suitability analysis of Nanjing Zhongshan scenic area[R]. Advances in Computer Science and Education Applications, 2011.
- [9] Ahmadi F F, Layegh N F. Integration of artificial neural network and geographical information system for intelligent assessment of land suitability for the cultivation of a selected crop[J]. Neural Computing & Applications, 2015,26(6):1311-1320.
- [10] Kong C, Lan H, Yang G, et al. Geo-environmental suitability assessment for agricultural land in the rural-urban fringe using BPNN and GIS: A case study of Hangzhou[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(15):1136.
- [11] Ferretti V, Pomarico S. Ecological land suitability analysis through spatial indicators: An application of the Analytic Network Process technique and Ordered Weighted Average approach[J]. Ecological Indicators, 2013,34(11):507-519.
- [12] Azizi A, Malekmohammadi B, Jafari H R, et al. Land suitability assessment for wind power plant site selection using ANP-DEMATEL in a GIS environment: case study of Ardabil province, Iran[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2014,186(10):6695-6709.

- 3665-3672.
- [6] Sterling S M., Ducharne A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 3(4):385-390.
- [7] 周忠学,任志远. 陕北土地利用变化与经济发展耦合关系研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(7):58-61.
- [8] 孙丕苓,许月卿,王数. 环京津贫困带土地利用变化的地形梯度效应分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(14):277-288.
- [8] 张静,任志远. 秦巴山区土地利用时空格局及地形梯度效应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14):250-257.
- [9] 李京京,吕哲敏,石小平,等. 基于地形梯度的汾河流域土地利用时空变化分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7):230-236.
- [10] 吴见,王帅帅,谭靖. 基于安徽省土地利用变化的地形梯度效应分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(2):239-248.
- [11] 叶庆华,刘高焕,田国良,等. 黄河三角洲土地利用时空复合变化图谱分析[J]. *中国科学:地球科学*, 2004, 34(5):461-474.
- [12] 常雄凯,刘森,李春林,等. 辽宁沿海土地利用变化的图谱特征[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(12):3459-3465.
- [13] 吕晓,史洋洋,黄贤金,等. 江苏省土地利用变化的图谱特征[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4):1077-1084.
- [14] 王金亮,邵景安,李阳兵. 近 20 a 三峡库区农林地利用变化图谱特征分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(2):235-247.
- [15] 龚文峰,袁力,范文义. 基于地形梯度的哈尔滨市土地利用格局变化分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(2):250-259.
- [16] 薄广涛,牛志君,郭义强,等. 冀西北间山盆地地区土地利用变化地形梯度效应[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1):1-6.
- [17] 陈楠,杨武年,李娟. 巴中市丘陵山区土地利用在地形梯度上的分布特征[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(1):185-188.
- [18] 庄逐舟,黄秋昊,石云. 黄土丘陵区土地利用变化与地形梯度关系研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(4):331-337.
- [19] 喻红,曾辉,江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J]. *地理科学*, 2001, 21(1):64-69.
- [20] 郭洪峰,许月卿,吴艳芳. 基于地形梯度的土地利用格局与时空变化分析:以北京市平谷区为例[J]. *经济地理*, 2013, 33(1):160-166, 186.

~~~~~

(上接第 236 页)

- [13] Malmir M, Zarkesh M M K, Monavari S M, et al. Analysis of land suitability for urban development in Ahwaz County in southwestern Iran using fuzzy logic and analytic network process (ANP) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(8):1-23.
- [14] 王如松,欧阳志云. 社会—经济—自然复合生态系统与可持续发展[J]. *中国科学院院刊*, 2012, 27(3):337-345.
- [15] Saaty T. The analytic network process: decision making with dependence and feedback. [J]. *International*, 2001, 95(2):129-157.
- [16] Gong Q Y, Tan X G, Zhong X L. Analytic network process in urban green space optimization[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2008, 21(4):10-85.
- [17] Aminu M, Matori A N, Yusof K W, et al. Application of geographic information system(GIS)and analytic network process(ANP)for sustainable tourism planning in Cameron Highlands, Malaysia [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2016, 567:769-774.
- [18] 黎孔清,陈银蓉,陈家荣. 基于 ANP 的城市土地低碳集约利用评价模型研究:以南京市为例[J]. *经济地理*, 2013, 33(2):156-161.
- [19] Zhang X, Wu Y, Shen L. An evaluation framework for the sustainability of urban land use: A study of capital cities and municipalities in China[J]. *Habitat International*, 2011, 35(1):141-149.
- [20] Jayant A. An application of analytic network process (ANP) to evaluate green supply chain management strategies: A case study[R]// *Matec Web of Conferences*, 2016.
- [21] 王莲芬. 网络分析法(ANP)的理论与算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2001, 21(3):44-50.
- [22] Saaty T L. Decision making with dependence and feedback: The analytic network process[J]. *International*, 1996, 95(2):129-157.