

经济地理
Economic Geography
ISSN 1000-8462, CN 43-1126/K

《经济地理》网络首发论文

题目： 基于地理探测器的天津市生态用地格局演变
作者： 李颖, 冯玉, 彭飞, 陈树登
网络首发日期： 2017-12-06
引用格式： 李颖, 冯玉, 彭飞, 陈树登. 基于地理探测器的天津市生态用地格局演变. 经济地理. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1126.K.20171206.1019.016.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发纸质期刊已正式录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿的论文。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于地理探测器的天津市生态用地格局演变¹

李颖¹, 冯玉¹, 鹏飞^{2*}, 陈树登³

(1. 辽宁师范大学 城市与环境学院, 中国辽宁 大连 116029; 2. 辽宁师范大学 海洋经济与可持续发展研究中心, 中国辽宁 大连 116029; 3. 河北安国中学 中国河北 安国 071200)

摘要: 生态用地是衡量区域生态系统健康和安全的土地单元。认识和探讨生态用地时空分布和形成机理对城市制定土地管理策略和引导城市可持续发展具有深远意义。运用重心转移模型、核密度估计、地理探测器和生态系统服务价值系数法等, 综合分析 2000-2014 年天津市生态用地质量及生态用地时空演变特征, 并探讨其形成机理。结果表明: (1) 天津市生态用地呈持续减少趋势, 其中滨海新区表现最明显; 生态用地转移对象主要为建设用地。(2) 生态用地重心落在天津市中东部, 地理位置上呈先向南移后向北移, 空间分布不均衡性进一步加剧。(3) 天津市生态用地核面积集中分布在北部和东部, 且呈减少趋势。(4) 地理探测器结果显示社会经济因素对生态用地变化的解释力高于自然因素, 解释力最高的 3 个要素为一产比重变率(0.79)>总人口变化率(0.73)>二产比重变率(0.61), 区域产业结构和人口数量对天津市生态用地变化影响强度最大。(5) 天津市生态用地动态变化均为负值, 生态系统服务价值呈逐年减少趋势, 其中水域群落创造的生态系统服务价值最高。

关键词: 生态用地; 地理探测器; 生态系统服务价值; 驱动力; 天津市

中图分类号: F301.24

文献标志码: A

Pattern Evolvement of Ecological Land in Tianjin Based on Geogdetector

LI Ying¹, FENG Yu¹, PENG Fei^{2*}, CHEN Shu-deng³,

(1. College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China; 2. Liaoning Normal University Marine Economic and Sustainable Development Research Center, Dalian 116029, Liaoning, China; 3 Hebei Anguo High School, Anguo 071200, Hebei, China)

Abstract: Ecological land is a unit of land that measures the health and safety of a regional ecosystem. Understanding and discussing the spatial and temporal distribution of ecological land use and its formation mechanism have far-reaching significance to the city in formulating land management strategies and guiding the sustainable development. Using shift model, kernel density estimation, geographical detectors and ecosystem service value coefficient method and so on, the temporal and spatial evolution characteristics of ecological land use and ecological land use in Tianjin during 2000-2014 are analyzed and their formation mechanism is discussed. Results show that: (1) From 2000 to 2014, (1) The ecological land in Tianjin shows a continuous decreasing

收稿日期

修订日期

基金项目: 国家自然科学基金(41601114); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(H201783626, JZ201783606, L201683677)。

作者简介: 李颖(1986-), 山西太原人, 博士, 讲师, 主要从事区域环境与可持续发展等研究。E-mail: lynn8686@163.com

***通讯作者:** 鹏飞(1986-), 山西阳泉人, 博士, 讲师, 主要研究方向为海洋政治地理与区域创新发展。E-mail: pfly324@163.com

trend, of which New Coastal Region has the most obvious performance; the main target for the transfer of ecological land is construction land. (2) Middle East area becomes the main ecological center of Tianjin, and it was unstable from south to north and leads to distribution imbalance further more. (3) The area of ecological land of Tianjin was mainly distributed in the north and east, and showed a decreasing trend. (4) The Geogdetector results showed that the socio-economic factors have more explanatory power than the natural factors, and the three factors with the highest explanatory power are the proportion of primary industry variable rate (0.79), total population change rate (0.73), and proportion of secondary industry variable rate (0.61). It showed that the regional industrial structure and population quantity have the strongest influence on the change of ecological land in Tianjin. (5) The dynamic change of ecological land use in Tianjin was negative, and the ecosystem service value decreased year by year. Among them, the value of ecosystem services created by water community was the highest.

Key words: Ecological land; Geogdetector; Ecosystem Services Value; Driving force; Tianjin

生态用地是维持区域生态系统健康与安全的重要载体,为人类生存提供必需的生态服务空间^[1-3]。城市生态用地与非生态用地供需存在空间结构的博弈^[4],长期以来,具有生态系统服务价值的生态空间单元得不到切实可行的保护,生态环境问题随之而来,21世纪以来,城镇化、工业化与资源开发导致的流域生态破坏、城镇人居环境恶化、自然海岸线丧失等问题加剧,极大的改变了生态用地的时空分布格局,破坏了自然生态系统服务功能,加剧了区域生态系统脆弱性,进而威胁区域生态平衡和城市可持续发展^[5-9],因此,生态用地成为城市发展过程中社会经济发展与生态环境保护矛盾的焦点。生态用地一词首先由我国学者董雅文提出,近些年来,众多学者着眼于生态用地的分类,也有学者基于景观安全格局定量识别区域生态用地,继而保护和管理生态用地。周锐等^[10]基于安全格局,通过构建“生态廊道”识别平顶山新区生态用地。此外,岳健等^[11-12]学者认为生态用地是区域土地中的主导功能是为提供生态系统服务的土地利用类型,可分为非农用地和非建设用地的被人类直接利用的土地,以及除人类之外的其他生物所直接利用或间接利用,但对生物多样性和生态系统起平衡和保护作用的土地。除对生态用地概念及分类的研究外,国内外学者对其数量和空间布局的研究,包括预测未来的数量及空间分布、对其质量评价、生态效益评估以及生态服务价值估算也取得较多成果^[13-16]。如何保证生态用地的质量问题也成为学者们研究的重点。学者们对不同地区的各类生态类型区展开生态用地质量评价,多采用指定适宜的指标体系的方法来处理当地的生态用地质量问题^[17]。李晓丽等^[18]将遥感与景观相结合,借助评价模型对长沙市城市生态用地进行评价分析,对优化生态用地的效能提出方法。朱战强等^[19]参考传统景观分析及空间分析法,对北京生态用地的格局和复杂性进行分析。国外对生态用地的研究尚未形成完整体系,但在其土地分类中涉及生态用地这一理念,例如 Klijn、Zonneveld 等^[20-21]分别对具有生态服务功能的土地进行分类及评价生态用地对区域的影响。

在生态文明建设和城镇化不可逆的背景下,提高生态用地的质量,实现区域生态环境和社会经济的共赢发展,成为当前亟待解决的问题。天津市作为海陆相互作用的特定区域,地理环境优越,是“京津冀协同发展”和“一带一路”国家战略中的重要城市,人地矛盾逐年增加,森林、湿地生态系统人工化趋势明显,城市生态系统格局变化剧烈,生态用地得不到切实可行的规划与管理^[22-23]。为扭转盲目追求城市化进程而破坏具有生态效益的土地单元的不利局面,本文借助 ENVI 平台获得天津市土地利用类型,运用转移矩阵、重心转移模型和核密度估计分析天津市生态用地时空变化特征;借助生态系统服务价值模型来计算各类生态群落的价值,以此反映生态用地质量;采用地理探测器定量探测识别影响生态用地时空演变

的各驱动力因素，以期为建成生态城市和实现城市可持续发展提供理论基础。继而保育城市发展的自然基础，充分发挥生态用地的生态服务价值，使得天津市生态用地在有限的条件下充分发挥其作用。

1 研究区概况

天津市（116°43'E-118°04'E，38°34'N-40°15'N）位于华北平原东北边缘，东临渤海湾，地势西北高东南低，由山地、丘陵和平原组成，沿海地势平坦，属冲积低地平原（图 1）。地处温带季风气候区，又因在半封闭浅海——渤海西岸，海洋性气候显著，春季多风干燥，夏季雨水集中，秋季冷暖适中，冬季寒冷干燥。天津位于海河流域下游，流经天津的河道众多。该区海水盐度较高，且相对稳定，多年平均盐度为 28.4‰，是我国重要海盐产地。土地类型多样，耕地、水域和盐场所占比重较高。该市是中国重要的老工业基地之一，滨海新区成为国家综合配套改革试验区。2006 年，国务院将天津市定位为“生态城市、环渤海地区经济中心、国际港口城市、北方经济中心”。



图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 生态用地分类

国内外学者对生态用地的概念及分类尚未形成统一标准，各国现行土地分类体系中并未将生态用地列为单独地类，导致生态用地的可持续发展受到威胁。目前对生态用地的分类大致存在两种观点：（1）直接或间接产生生态服务价值，对生态系统具有保护作用的生态空间定义为生态用地，包括林地、水域、草地、农田等；（2）生态用地以发挥自然生态功能为主，将用于生产的农业用地排除之外，如耕地、水产养殖等划分为非生态用地^[24]。近几年，我国各地区根据其自身地理环境特征对生态用地进行重分类^[25-26]。

沿海地区的生态用地及其生态服务功能已有学者研究。李姝娟等^[16]研究滨海新区生态用地特征与低碳目标下的优化策略时，将盐田、草地、水域、林地归类为生态用地。喻锋等

[27]列出了“生态用地统一分类与《全国土地分类（过渡期间使用）》”对照表，其生态用地包括湿地、森林（地）、草地和其他生态用地等一级地类，二级地类中的盐田归属生态用地中一级地类湿地。徐丽芬等[28]分析渤海湾沿岸地区土地利用的生态系统服务价值当量时，将盐田归类为生态服务价值当量较高的滨海湿地。张彪等[29]研究首都生态圈土地覆被及其生态服务功能特征时，也将盐田划分为湿地，且其单位面积生态服务价值最高，为 13.18 元 / (m² · 年)，农田生态服务价值最低，仅为 0.73 元 / (m² · 年)。俞炜炜等[30]研究福建兴化湾湿地生态服务功能时，盐田的单位生态服务价值为 33 992 元 / (hm² · 年)，农田的生态服务价值为 736 元 / (hm² · 年)。从现今环境恶化、环境污染、土地资源短缺的角度考虑，基于改善生态环境、优化配置土地资源，应重点强调：生态用地的第一要务应该是发挥生态服务功能为主，并且是对生态系统没有副作用的土地类型[31]。而农业用地在农业耕作期间，农药化肥等的使用在提高农作物产量的同时对自然界原有的生态系统食物链有所破坏，并产生一系列的生态副作用。综上所述，生态用地应该是非生产性地，非建设性地，并以发挥生态功能、维护区域生态平衡的土地[11-12]。故本文根据沿海地区各地类生态服务价值高低，将农田列为非生态用地，而保留有一定水域面积的盐田，其生态服务功能较大，且受陆地和海洋共同影响，生态环境脆弱，所以将盐田列为生态用地并加以保护和管理。最终确定天津市的生态用地包括林草地、水域和盐田。

2.2 数据来源与处理

本文土地利用数据以天津市 2000 年 8 月 (Landsat4-5TM)、2006 年 8 月 (landsat4-5TM) 和 2014 年 9 月 (Landsat8OLI_TIRS) 3 期遥感图像为基本数据源，以 ENVI 5.0 软件为平台，经过几何纠正、图像增强等预处理，采用监督分类和人工目视解译，根据研究区特点，将土地覆被归类为 6 种 (耕地、林地、盐地、水域、建设用地和未利用土地)，并结合 Google Earth 对其分类结果进行精度检验，2000 年、2006 年和 2010 年 Kappa 系数分别为 0.787、0.837、0.780，达到了较好效果。在 ArcGIS 平台上建立天津市生态用地及影响因子数据库，DEM 数据来源于地理空间数据云 (www.gscloud.cn)，驱动力因子数据来源于《天津统计年鉴》。

2.3 研究方法

2.3.1 土地转移矩阵

土地转移矩阵是指在一定时间内一种土地利用状态在随着时间的转化过程，其数学表达式为：

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

式中 A_{ij} 为研究初期与研究末期的土地利用状态， n 为土地利用类型数。

2.3.2 重心转移模型

生态用地转移采用重心转移模型定量分析。假设研究区由 n 个单元组成，其中第 i 单元的地理重心坐标为 (X_i, Y_i) ，为该单元的某类型用地面积，则研究区生态用地重心坐标 (X, Y) 为：

$$X = \sum_{i=1}^n X_i M_i / \sum_{i=1}^n M_i \quad (2)$$

$$Y = \sum_{i=1}^n Y_i M_i / \sum_{i=1}^n M_i \quad (3)$$

生态用地第 t 、 $(t+n)$ 年重心分别为 $Kn(X_t, Y_t)$ 、 $Kn(X_{t+n}, Y_{t+n})$ ，则研究期间生态用地重心转移距离为：

$$G_n = \sqrt{(X_{t+n} - X_t)^2 + (Y_{t+n} - Y_t)^2} \quad (4)$$

2.3.3 核密度估计

核密度估计表示特定地理事物在空间上的分布，且不同的空间位置具有不同的概率分布

[32]。若某区域具有密集的斑点分布,则该区域地理事物分布的概率高;反之则概率低。核密度估计常用于进行空间栅格探测研究,利用空间平滑对点状数据进行密度分析。本研究采用核密度估计测度天津市生态用地的空间分布密度,其数学表达式为:

$$f_u(x) = \frac{1}{nh_n} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-x_i}{h_n}\right) \quad (5)$$

式中 n 为样本数; h_n 为带宽,即搜索半径; $k\left(\frac{x-x_i}{h_n}\right)$ 为核函数。

2.3.4 地理探测器分析方法

地理探测器机理分析法,是运用于空间数据探索的方法之一,地理事物的空间分布具有明显差异,其分布受自然地理环境要素和人文社会经济因素共同影响。该方法运用的原理在于既可以检验单变量的空间分异性,也可通过检验两个变量空间分布的一致性,来探测两变量之间可能的因果关系。传统的土地利用变化驱动力因子分析中主要采用统计分析方法、系统分析法和模型化方法[33-35],这些传统计算模型假设条件和数据要求较多,例如同方差性和正态性,而现实地理事物几乎没有完全满足这些条件假设,以致于其数学模型的效果受影响,但地理探测器模型假设制约条件比较少,该模型的最大特征在于其几乎无假设条件,可以有效克服传统数学统计模型处理此类问题的局限性[36]。地理探测器最早被应用于疾病风险与地理环境要素的相关性研究[37],近年来有学者将因子探测器用于建设用地和农村用地变化形成机理的研究[38-39]。本文则利用风险探测和因子探测综合探测天津市生态用地变化与各影响因素之间的相互关系。

风险探测用于探测哪些类型变量是生态用地变化的高值或低值,通过 t 检验来度量:

$$t_{ij} = \frac{R_i - R_j}{\sqrt{\sigma_i^2/n_i - \sigma_j^2/n_j}} \quad (6)$$

式中 t_{ij} 为 t 检验值, R_i 和 R_j 分别为属性 i 和 j 的生态变化率均值, σ_i^2 和 σ_j^2 分别是属性 i 和 j 的生态变化率方差, n_i 和 n_j 为两个属性的样本量。

因子探测用于识别各要素对生态用地变化的解释力大小,其模型如下:

$$P_{D,U} = 1 - \frac{1}{n\sigma_U^2} \sum_{i=1}^m n_{D,i} \sigma_{U_{D,i}}^2 \quad (7)$$

式中 $P_{D,U}$ 为生态用地变化影响因素解释力指标, $n_{D,i}$ 为次级区域的个数; n 为整个区域的个数; m 为次一级区域的样本数; σ_U^2 为整个区域生态用地变化的方差; $\sigma_{U_{D,i}}^2$ 为次一级区域生态用地变化的方差,假设 $\sigma_{U_{D,i}}^2 \neq 0$, 则模型成立。 $P_{D,U}$ 的取值区间为 $[0, 1]$, $P_{D,U}=0$ 时,表明天津市生态用地变化空间分布呈随机分布; $P_{D,U}$ 值越大,说明分区因素对天津生态用地的变化影响越大。

2.3.5 生态系统服务价值评价

(1) 生态服务价值系数法

对生态用地的生态质量评价主要通过评价生态系统服务价值来表现。基于 Costanza 提出的生态系统服务价值计算方法,并参照前人的研究成果[40-41],确定计算天津市生态用地服务价值公式为:

$$V = \sum_{i=1}^n (A_{ec} \times (\sum_{j=1}^m UV_j)) \quad (8)$$

式中: V 表示生态系统服务总价值; n 表示生态群落个数; A_{ec} 为每种生态群落的面积; UV_j 为每种生态系统服务类型的单位价值量; m 为生态系统服务类型的个数。

(2) 生态用地生态系统服务价值变化动态度

生态服务价值动态描述一定时期内某种生态用地类型生态服务价值的变化速度,公式如下:

$$k = \frac{V_b - V_a}{V_a} \times \frac{1}{T} \quad (9)$$

式中， V_a 为研究初期某种生态用地类型的生态服务价值； V_b 为研究末期生态用地类型的生态服务价值； T 为研究时段。若 $k > 0$ ，生态服务价值呈增长趋势；若 $k < 0$ ，生态服务价值呈减少趋势；若 $k = 0$ ，生态服务价值不变。

3 实例分析

3.1 天津市生态用地与非生态用地转移

根据土地转移矩阵模型（公式 1）和天津市 2000 年、2006 年、2014 年 3 期土地利用数据，计算得到 2000-2014 年土地利用转移矩阵（表 1-2）。

表 1 2000-2006 年天津市土地利用转移矩阵 (hm²)

Tab. 1 Land use transition matrixes of Tianjin in 2000-2006 (hm²)

土地利用类型		生态用地			非生态用地		
		水域	盐田	林草地	耕地	建设用地	未利用地
生态用地	水域	25 659.19	5 222.52	2 175.12	9 886.41	2 202.93	3 855.96
	盐田	4 963.59	56 502.27	4 198.32	24 468.21	11 275.83	382.23
	林草地	1 698.66	257.58	31 890.42	21 618.09	2 001	260.28
非生态用地	耕地	4 247.28	3 547.53	19 106.46	589 191.93	38 087.37	392.85
	建设用地	6 036.03	15 569.1	8 180.28	137 864.52	119 064.51	247.68
	未利用地	168.93	0	0	84.78	6.93	1 440.45

2000-2014 年间，天津市生态用地面积持续减少，其中在滨海新区的降低幅度最大（图 2）。2000-2006 年，生态用地转化为非生态用地面积为 $5.68 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，主要转化为耕地和建设用地，林草地转化为耕地的面积最大为 $1.91 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，盐田向建设用地转化面积最大为 $1.55 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。说明天津市城市化快速发展，城市建设用地大量侵占生态用地；且在商品粮利益驱使下，大量生态用地被开垦为耕地。非生态用地转为生态用地的面积为 $7.59 \times 10^4 \text{hm}^2$ ，其中 79% 转化为林草地和盐田，转化为水域的面积最少。

表 2 2006-2014 年天津市土地利用转移矩阵 (hm²)

Tab. 2 Land use transition matrixes of Tianjin in 2006-2014 (hm²)

土地利用类型		生态用地			非生态用地		
		林草地	水域	盐田	耕地	建设用地	未利用地
生态用地	林草地	33 262.65	237.42	113.83	11 815.65	676.62	0
	水域	231.03	26 201.34	13 681.89	2 994.93	3 810.61	790.83
	盐田	0	2 382.39	28 743.75	53.19	372.06	0
非生态用地	耕地	20 006.91	2 020.14	6 459.31	503 356.32	51 877.8	3 224.25
	建设用地	4 300.2	14 386.05	54 781.21	136 673.55	227 330.01	2 061.27
	未利用地	0	3 871.98	42.3	30.42	19.26	8 589.6

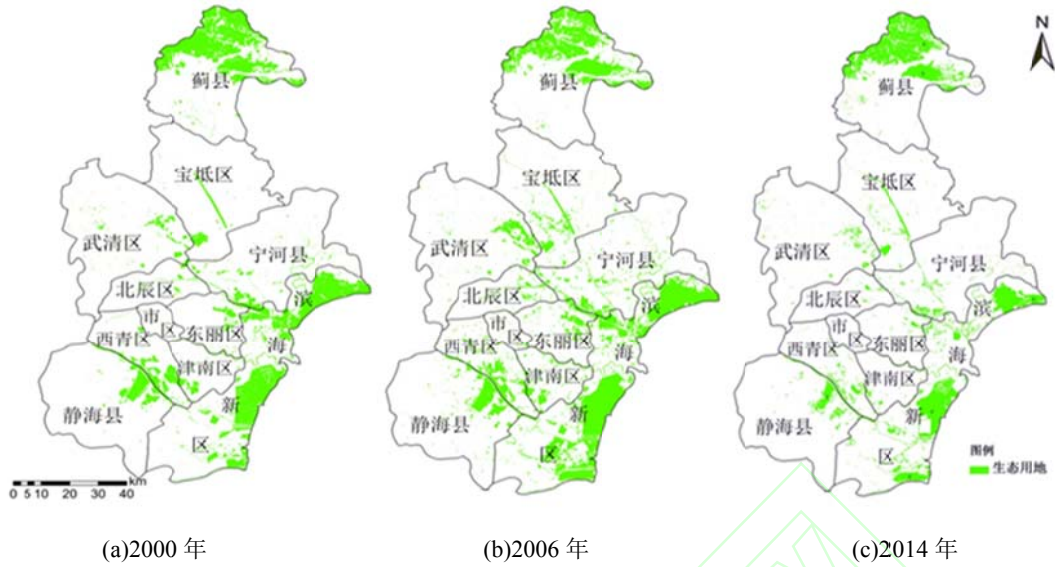


图 2 天津市生态用地变化

Fig. 2 Ecological land changing in Tianjin(a、b、c)

2006-2014年,生态用地转化为非生态用地的面积为 $10.58 \times 10^4 \text{hm}^2$,生态用地 26%转化为耕地, 69%转化为建设用地,林草地主要转化为耕地,水域和盐田主要转化为建设用地,其中盐田向建设用地转移面积最大为 $5.47 \times 10^4 \text{hm}^2$,说明城市化进程加快,建成区面积逐年增加,尤其滨海新区的开发,大量盐田变为建设用地。非生态用地转化为生态用地的面积为 $2.05 \times 10^4 \text{hm}^2$,转移的主要去向为林草地和水域,转移比例分别为 60%和 37%,耕地主要转化为林草地,建设用地主要转化为水域。总体而言,该时段生态用地转化为非生态用地是非生态用地转化为生态用地的 5 倍。

3.2 生态用地重心转移

以天津市行政区为基本单元,根据公式(4),采用 ArcGIS 空间分析方法得到 2000 年以来生态用地的地理重心演变路径(表 3)。

天津市林草地重心落在天津市的北部蓟县,2006年林草地重心较2000年向东偏移 1.1km,偏移距离较短。2014年较2006年向西南偏移 17km,2014较2000年向南偏移 14.3km。天津市林草地主要分布在北部蓟县,2006-2014年,天津市南部各区县注重绿化带建设,以致该研究时段内林草地重心向南偏移,林草地空间分布的极不平衡性有所缓解。

水域重心落在中部,2000-2006年水域重心向南偏移 9.8km,2006-2014年,水域重心向北偏移 6.2km。研究时段内水域重心先向南偏后向北偏,3期重心都在该市中心位置,表明水域分布基本平衡。

表 3 天津市生态用地地理重心

Tab. 3 Geographical focus of ecological land in Tianjin

类型	年份	空间位置		移动距离 (km)	所在县域
		经度	纬度		
生态用地	2000	117°29'44"E	39°24'13"N	-	宁河县
	2006	117°28'55"E	39°19'39"N	8.7	宁河县
	2014	117°29'14"E	39°28'24"N	16.1	宝坻区
林草地	2000	117°26'20"E	39°6'46"N	-	蓟县
	2006	117°26'59"E	39°6'54"N	1.0	蓟县

	2014	117°26'8"E	39°4'7"N	5.1	蓟县
	2000	117°24'1"E	39°17'23"N	-	宁河县
水域	2006	117°24'26"E	39°12'2"N	9.8	东丽区
	2014	117°24'11"E	39°13'55"N	3.6	东丽区
	2000	117°34'22"E	39°4'40"N	-	滨海新区
盐田	2006	117°31'50"E	39°5'8"N	4.0	东丽区
	2014	117°41'26"E	39°59'17"N	17.9	滨海新区

盐田重心在滨海新区，2006年较2000年重心向西偏移4km，2006-2014年重心向东南偏移17.9km，2000-2014年重心向东南偏移14.3km。研究时段前期，在经济利益驱使下，盐田从东南沿海向西北逐年增加。研究时段后期，在滨海新区大力发展的背景之下，盐田面积从西北部向东南滨海逐年萎缩，使得盐田重心向东南偏移。

生态用地重心落在中东部，2000年、2006年、2014年生态用地重心分别落在宁河县、宁河县、宝坻区。2006年生态用地重心较2000年向南偏移8.7km，2014年生态用地重心较2006年向北偏移16.1km，2014年较2000年生态用地重心向北偏移7.3km。2000-2006年北部的林草地呈减少趋势，2006-2014年东南部盐田面积急剧下降，而在退耕还林还草和保护植被政策引导下林草面积逐年增加，以致生态用地呈先向南移后向北移的态势，研究时段内西南部生态用地分布较少，仅零星分布。因此，生态用地空间分布的不均衡性进一步加剧。

3.3 天津市生态用地核密度估计

天津市生态用地占据一定空间，且具有一定空间组织结构，为进一步探析生态用地的空间分布结构及其变化，根据公式(5)，借助ArcGIS平台，将其抽象为系列生态用地质点，对其进行核密度分析，计算2000、2006与2014年天津市生态用地的空间核密度值，并将其分为低值区、较低值区、中值区、较高值区和高值区，选取天津市行政区域矢量图为对照区，生成2000、2006与2014年的生态用地空间核密度分布(图3)。

2000-2014年，天津市生态用地核密度最高值分布区主要集中在北部，呈现面积较大的块状分布，且其核面积呈减少趋势，而天津市中部和南部区、县仅存在面积较小的零星核分布。2006年较2000年生态用地核面积呈减小趋势，中部宝坻区、北辰区和西南部静海县减小幅度最为显著，而北部蓟县和西部武清区其核面积增加，表明2000-2006年天津市中部的区县生态用地斑块数量减少，而蓟县和武清县呈现增加趋势。2006-2014年，高值区面积减小幅度增大，该区中部和南部地区无高值区，除宝坻区和武清区，所有区县核面积都呈减小趋势，尤其市区、北辰区、东丽区和津南区核面积基本无分布，表明该时段天津市生态用地斑块数量及其面积都呈减小趋势，在城市化进程中，市区及其周边辖区的建成区面积猛速扩张使得该区域生态用地斑块数量明显降低。

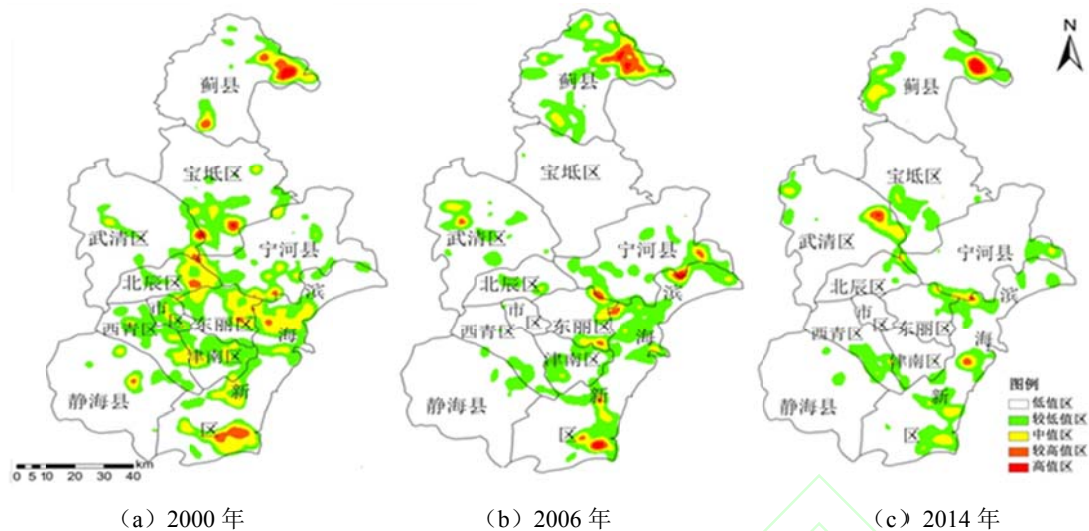


图3 天津市生态用地核密度估计 (a、b、c)

Fig. 3 Core density estimation of ecological land in Tianjin (a、b、c)

结合转移矩阵、重心转移模型和核密度估计3种方法, 综合分析天津市2000-2014年生态用地演变特征。2000-2006年林草地主要转化为建设用地, 研究前期面积呈减少趋势, 2006-2014年期间受退耕还林、还草政策的影响, 区域内少部分耕地转变为草地, 且该时段整体向南偏移14.3km, 说明天津市南部区县的林草地呈逐年增加趋势, 因此, 转移矩阵和重心转移2种方法分析林草地时空变化相吻合。水域在研究期间面积略有增加, 得益于人工公园水体面积的增加, 由于2000年以后天津市各区县都比较重视自然生境和人工湿地的改造和管理, 当地采取了一些土地整理和土地开发措施, 在农村建设用地向城市建设用地发展的同时, 调整农村居民点建设用地, 重新利用废弃建设用地, 一些建设用地转化为水域及水利设施用地, 提高土地利用率, 且研究区水域分布较分散, 研究期间水域重心都在该市中心位置, 因此天津市淡水水域分布基本平衡。盐田主要位于滨海新区, 其面积主要转化为建设用地, 其中2000-2006年其重心向西偏移, 由于滨海新区西部土地盐碱化较为严重, 另外长期污水灌溉, 以致该区西部部分耕地转化为盐田, 2006-2014年滨海湿地面积继续减少, 减少量为研究前期二倍, 2006年建设用地主要集中在汉沽、塘沽和大港的建成区, 之后随着滨海新区的大力开发, 建设用地快速向沿海扩张, 征用大量盐田, 因此滨海湿地重心向东偏移。天津市2000-2014年生态用地面积总体呈减少态势, 研究前期其面积减少幅度和变化动态度小于研究后期, 因此其核密度分布面积逐年减少, 生态用地分布密度也逐年减小。

3.4 天津市生态用地时空演变驱动力分析

生态用地变化是自然环境条件和社会经济条件共同作用得到的, 综合考虑天津市各区的自然环境特征和社会经济因素, 遴选出影响天津市生态用地时空格局变化的驱动因子。自然环境条件主要指气象要素。其中, 气象要素是区域自然环境发展的“天然制约力”之一, 而降水对于城市生态用地的布局演变起重要作用, 降水量的多寡对生态植被的生长发育有明显的影响, 温度与日照在一定程度上会影响森林等生态群落的生长, 从而影响到生态用地的面积、数量增减, 故选择年降雨量、年平均气温、年总日照时数三个指标作为自然环境条件下的影响因子。

生态用地与人类社会经济活动存在空间结构的博弈, 主要选取经济发展水平、产业结构、人口结构和城市面积等因子探究对生态用地变化的影响。在城市交通条件方面, 交通通达度会影响人类的活动范围, 城市道路的布局会影响城市生态用地的分布格局, 故将距主干道距离、和距河距离作为影响生态用地变化的指标。随着社会经济的发展, 城乡人口结构发生变

化,相应地刺激了产业的大规模发展,不断推动着城市建设用地的扩展,城市化进程的加快、建设用地的扩张对生态用地构成一定威胁,在一定程度上会减少生态用地的面积。但由于政策影响和社会发展,居民对人居环境的要求越来越高,意识到生态用地对人居环境会产生较大的生态环境效益,因此,选取总人口变化率、城市化变化率、地区 GDP、第一产业比重变化率和第二产业比重变化率作为分析生态用地时空格局变化的主要社会驱动因子,并对天津市生态用地格局演变机理进行探测研究。

综合考虑天津市各区的自然环境特征和社会经济因素,以及数据可获得性,遴选总人口变化率、城市化变化率、地区 GDP、第一产业比重变化率、第二产业比重变化率、距主干道距离、距河流距离、年平均气温、年降水量、年总日照时数 10 项指标进行等级分区,分别探测各项指标对天津市生态用地时空变化的影响。

表 4 生态用地变化与各显著影响因子的比较

Tab. 4 Comparison of ecological land changing and significant influence factors

影响因素		级别					
自然环境条件	年降雨量	A1	408	454	472	519	535
		a1	-50	-36	-35	-31	-9
	年平均气温	A2	11	15	13	12	14
		a2	-41	-37	-38	-37	-39
	年均日照时数	A3	2290	2417	2421	2395	2403
		a3	-38	-41	-39	-37	-39
地区 GDP	A4	4	6	10	13	16	
	a4	-12	-25	-43	-46	-50	
社会经济因素	总人口变化率	A5	6	9	15	20	22
		a5	-11	-34	-39	-41	-50
	城市化变化率	A6	16	23	29	34	39
		a6	-51	-32	-27	-33	-38
	一产比重变化率	A7	-87	-82	-66	-55	-20
		a7	-35	-41	-33	-10	-50
二产比重变化率	A8	-39	-20	-5	-4	14	
	a8	-50	-14	-31	-41	-48	
距河距离	A9	1	3	5	9	14	
	A9	-11	-32	-50	-28	-50	
距道路距离	A10	4	7	11	15	23	
	A10	-48	-34	-29	-37	-9	

注: A1-A10、a1-a10 分别表示各因子变化率和生态用地变化率

通过公式(6)进行风险探测结果表明,自然环境和社会经济因子与生态用地变化具有相对一致性,除年平均气温、年总日照时数外,各因子与生态用地变化均具有显著差异(表4)。社会经济因素中地区 GDP 变化率、总人口变化率与生态用地变化率呈正比例关系,城市化变化率、一产业比重变化率和二产业比重变化率对生态用地变化的影响呈现出中间低,两头高的特征,生态用地距离道路越近,其变率越大,而距河流越远,变率越大。城市化变化率和第一产业比重变率在第 1 级至 4 级生态用地变化率呈降低趋势,第 4 级至第 5 级转为增加趋势。第二产业比重变率位于 1 级时生态用地变化率最大,居于 2 级时变化率最小,3 至 5 级随着第二产业比重变率的增加,生态用地变化率增加。自然环境因素中,生态用地变

率与降水量呈负相关，降水量较多的区域，生态用地变率较小。

依据地理探测器的因子探测模块对各项指标进行自然聚类分级，利用公式（7）得出各项指标对生态用地变化率影响力 $P_{D,U}$ 值（表 5）。

表 5 天津市生态用地变化影响因素探测结果

Tab. 5 Detection results of the influence factors of ecological land changing in Tianjin

影响因素	一级	二级	三级	四级	五级	$P_{D,U}$ 值	
自然环境条件	年总日照时数	<2350	2350-2390	2300-2400	2400-2410	2410-2430	0.13
	年降水量	<454	454-496	496-515	515-524	524-547	0.37
	年平均气温	<12	12-12.6	12.6-13	13-14.3	14.3-15	0.22
	距河流距离	<1	2-4	4-6	6-12	12-16	0.48
	距道路距离	<3-5	5-9	9-13	13-16	16-29	0.42
社会经济因素	GDP 变化率	<4	4-7.9	7.9-10.2	10.2-11.5	11.5-17.7	0.57
	总人口变化率	<5-7	7-11	11-18	18-21	21-24	0.73
	城市化变化率	<26	26-29	29-31	31-35	35-40	0.34
	一产比重变率	< -86	-86- -78	-78- -62	-62- -51	-51- -2	0.79
	二产比重变率	<-39	-39- -9	-9- -2	-2-6	6-21	0.61

从生态用地变化影响因子探测结果看（表5），社会经济因素对天津市生态用地的变化具有至关重要的作用，突出表现为一产比重变率、总人口变化率、二产比重变率和GDP变化率，这4个区位条件要素的解释力远高于其它影响因素。由此可知，在研究时段内，天津市生态用地的变化与产业结构、人口数量变化关系密切，尤其天津市为城市化和产业升级较快的城市，对于生态用地的时空演变具有十分重要的意义，这表明区域产业结构不合理和区域人口数量与生态用地的矛盾突出。第二产业的快速发展带来经济水平的提升，为了追求经济效益，增加厂房建设，建设用地面积的增加，对生态用地的影响尤为明显；其次，非农业人口的增加带来生态用地的减少，经过进一步探测分析，非农业人口增加较快的地区，生态用地减少的速度较慢，表明城市人口的增加，城市化进程较快的地区，人们对生态环境需求较大，对生态用地的要求较高，在一定程度上有助于生态用地的形成。而非农业人口增加较为缓慢的地区，生态用地减少速度较快。这种负向影响一方面说明农业人口较多地区，农药、化肥等使用对生态用地负影响较大，使得生态用地破坏程度较大，另一方面也说明城市化率变化并不是传统生态用地驱动研究中的主要驱动因子，而其他影响因素的作用则更加突出明显；再次，自然环境条件对生态用地变化同样具有一定影响力，但由于研究时段该条件相对稳定，以致其对生态用地的变化小于社会经济条件，年平均降水量对生态用地变化的解释力最大，这表现了水资源对天津市生态用地的影响。研究同时考虑了是否出现极端降水年份对生态植被形成的影响，探测结果表明，降水量对生态用地的驱动确实高于日照与气温。充足的水分有利于生态植被的形成，有利于保持生态用地所带来的生态效益。所以水分条件是制约生态用地变化的重要自然环境因素；最后，日照时数和气温对生态用地变化解释力最小，天津市各区县基本均位于海拔较低的平原（除蓟县），并且该市各区、县气温差异不明显，而天津市区域较小，日照时数变化不大，所以日照时数和气温对生态用地变化的影响力最小。

综上所述，生态用地演变受到相关人文自然因素综合影响，社会经济因素对生态用地变化的解释力高于自然因素。人口结构和经济发展是导致城市生态用地变化的重要驱动力，从而影响生态用地的数量和结构。21 世纪以来，天津市人口增长率快速上升，由于城市化快速发展的需要，建设用地增加，导致生态用地呈逐年减少。随着经济的发展和产业结构的升

级，土地利用效率得到提高，建成区加大了对生态自然保护区的建设和管理，发展生态文化旅游成为天津市经济建设的一部分，使得研究后期部分区县的林草地和水域面积略有增加。自然因素中气温和降水对天津市生态用地的分布格局影响较大，根据相关资料^[43-44]，天津市近 60 年气温呈现升高趋势，降水呈下降趋势，21 世纪以来降水量减少幅度较大，暖干化的气候条件使得天然林草地和天然水域面积萎缩，生态用地面积有所减少。

3.5 天津市生态用地生态质量评价

研究利用生态系统服务价值当量来代表质量，其中，生态系统服务是指生态系统为了维持人类生产、消费、流通等行为活动所提供的有形或无形的自然产品、环境资源以及生态公益的能力^[42]。根据之前的研究，将天津市的生态用地设定为 3 个生态群落，分别为林草地、水域和盐田，选取 9 种生态服务类型，根据天津市生态用地的实际情况，参照“中国生态系统服务价值当量表”确定天津市生态用地与生态服务类型间的单位价值当量如表 6，根据公式 8 计算得到天津市生态系统服务总价值（表 7），并分析 2000-2014 年生态系统服务总价值的变化动态度（表 8）。

表 6 天津市各类生态用地的单位面积生态服务价值当量

Tab. 6 ecological services value equivalent per unit area of ecological land in Tianjin

	气体 调节	气候 调节	水源 涵养	土壤 形成	废物 处理	食物 生产	生物多样性 保护	原材料	文化 娱乐	合计
林草地	4.8	4.9	4.6	6.8	2.6	0.8	4.9	2.45	1.7	33.55
水域	0.5	1.2	23	0.8	24	0.65	3	0.8	6.4	60.35
盐田	0.1	0.3	0.5	0.2	0.2	1.6	1.1	2	0.1	6.1

表 7 天津市生态用地生态服务总价值

Tab. 7 the total value of ecological services of ecological land in Tianjin

生态群落	单位价值 (元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	总价值 (万元)		
		2000	2006	2014
林草地	30416.4	132.7	130.2	126.5
水域	56663.8	6323.4	5630.7	5029.1
盐田	22476.9	683.9	547.2	511.8
合计	-	7140	6308.1	5667.4

表 8 天津市生态用地生态服务价值变化动态度

Tab. 8 Change dynamic degree of ecological land ecological service value in Tianjin

生态群落	生态服务价值变化动态度		
	2000-2006	2006-2014	2000-2014
林草地	-0.0031	-0.0036	-0.0033
水域	-0.0183	-0.0134	-0.0146
盐田	-0.0333	-0.0081	-0.0179

2000-2014 年间，天津市生态用地生态服务价值变化动态度值均为负值，生态系统服务总价值呈逐渐减少态势，2000 年生态系统服务总价值达 7 140 万元，2014 年，总价值则低至 5 667.4 万元（表 7），生态服务价值变化动态度为-0.0147，下降趋势明显且幅度较大。其中，水域和盐田的生态系统服务价值变化率较高，分别为-0.0146 和-0.0179，二者所占总价

值比重高于林草地。天津市作为海滨城市，水域创造的总价值明显高于其它两种生态群落，水域的生态环境质量也较高，但随着城市化的扩张，生态用地面积减少，其生态系统服务总价值也随之减少。

4 结论与讨论

4.1 结论

基于县域尺度，从空间分析角度出发，运用 GIS 分析工具，采用土地转移矩阵、重心转移模型、核密度估计和地理探测器模型等方法，分析 2000-2014 年天津市生态用地的时空演变及其影响因素。研究结论如下：

(1) 2000-2014 年，天津市生态用地的空间分布格局极不稳定。土地利用变化过程中生态用地呈持续减少态势，其中滨海新区最为突出。2000-2006 年，生态用地转化为非生态用地是非生态用地转化为生态用地的 3.6 倍，生态用地转移对象主要是建设用地和耕地。2006-2014 年，生态用地转化为非生态用地是非生态用地转化为生态用地的 5 倍，生态用地主要转化为建设用地，非生态用地转移主要去向为林草地和水域。

(2) 天津市生态用地空间分布呈现出不均衡的特征，东部和北部分布较多，而西南部较少，且研究时段内不均衡性进一步加剧。生态用地重心落在天津市中东部，研究时段内呈先向南移后向北移的态势；林草地重心落在天津市北部，研究时段内重心向南偏移，空间分布极不均衡性有所缓解；水域重心落在天津市中部，分布格局相对均衡；盐田重心落在滨海新区，研究时段后期在滨海新区大力开发的背景下盐田面积逐年萎缩，盐田重心向东南偏移。

(3) 2000-2014 年，天津市生态用地核密度最高值主要集中分布在北部，中部和南部区、县仅存在较小面积的零星分布，且核面积呈减小趋势，表明城市化进程中天津市生态用地斑块数量减少。

(4) 天津市生态用地演变具有农业发展指向、工业发展指向和人口发展指向。区域产业结构和人口数量对天津市生态用地变化影响强度最大。生态用地的演变受相关人文自然因素综合影响，社会经济因素对生态用地变化的解释力高于自然因素，解释力最高的 3 个要素为一产比重变率(0.79)、总人口变化率(0.73)、二产比重变率(0.61)。

(5) 2000-2014 年间，天津市生态用地生态服务价值变化动态度值均为负值，生态系统服务价值呈逐年减少的趋势，其中水域的生态系统服务价值最高，占总价值比重较大。水域和盐田的生态系统服务价值变化率较高，天津市生态用地的生态系统服务价值随着生态用地的减少而减小，与城市化的快速发展有密切关系。

4.2 展望

本文从土地类型转移、重心变化、核密度分析以及时空格局形成机理等多角度对天津市生态用地的特征进行了分析，与同类相关研究相比，研究视角更加广泛，比较全面的理清了天津市 2000-2014 年生态用地变化过程特征。本文将地理探测器模型借鉴到生态用地的驱动机理研究中，使得定量分析各要素对生态用地时空变化的影响大小和形成机理成为可能。并考虑生态用地数量、结构类型以及质量的变化情况，较为全面地分析了天津市生态用地现状。就生态用地的质量研究而言，本文选择通过生态系统服务价值对其进行研究，在今后的学术研究中，可寻求更准确的研究方法对其进行探讨，对地区内生态用地质量进行详细分析，将考虑从时空对比角度分析生态用地的变化及影响生态用地变化的原因，并更进一步分析这些影响因素是否会对生态用地的质量产生影响，从而保证科研的持续性和传承性。在研究生态用地时空分布变化形成机理时，由于数据的可获取性及有效性，仅从自然环境条件、社会经济因素 2 个方面选取了相关指标，选取的影响要素较为有限，且研究指标可能存在不足，后期研究可在条件允许的情况下，充分考虑政策制度、环保要求、法律规定等相关指标，进一步完善指标选取，对生态用地的影响因子进行充分探测。此外，随着居民环保意识的提高，

自发性栽种植被已成为新潮流,在今后研究中,这一因素也应被考虑,以便充分发挥区域生态用地的生态作用,以保障生物多样性及区域生态安全。

参考文献:

- [1] MEA (Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and Human Well-Being [M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [2] Termorshuizen J W, Opdam P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development [J]. *Landscape Ecology*, 2009, 24(8): 1037-1052.
- [3] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 等. 人类活动对生态系统服务功能的影响[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 118-126.
- [4] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 等. 生态用地分类初步研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 1-7.
- [5] 褚琳, 黄翀, 刘庆生, 等. 2000-2010年辽宁省海岸带景观格局与生境质量变化研究[J]. *资源科学*, 2015, 37(10): 1962-1972.
- [6] DeFries R S, Foley J A, Asner G P. Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(5): 249-257.
- [7] 颜磊, 许学工, 谢正磊. 北京市域生态敏感性综合评价[J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 3117-3125.
- [8] 涂小松, 龙花楼. 2000-2010年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化[J]. *资源科学*, 2015, 37(12): 2451-2460.
- [9] 彭月, 李昌晓, 李健. 2000-2012年宁夏黄河流域生态安全综合评价[J]. *资源科学*, 2015, 37(12): 2480-2490.
- [10] 周锐, 王新军, 苏海龙, 等. 平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建[J]. *生态学报*, 2015, 35(6): 2003-2012.
- [11] 岳健, 张雪梅. 关于我国土地利用分类问题的讨论[J]. *干旱区地理*, 2003, 26(1): 80-87.
- [12] 邓红兵, 陈春娣, 刘昕. 区域生态用地的概念及分类[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1519-1524.
- [13] 牛彦琼, 李双江, 罗晓, 等. 基于碳氧平衡法的石家庄生态用地需求研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(12): 7325-7327.
- [14] 李锋, 叶亚平, 宋博文, 等. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变-以常州市为例[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5623-5631.
- [15] 龚建周, 刘彦随, 张灵. 广州市土地利用结构优化配置及潜力[J]. *地理学报*, 2010, 65(11): 1391-1400.
- [16] 李姝娟, 李洪远, 孟伟庆. 滨海新区生态用地特征与低碳目标下的优化策略[J]. *中国发展*, 2011, 11(4): 82-87.
- [17] 连莲. 广州市中心镇生态用地的质量评价及结构优化[D]. 广州大学, 2013.
- [18] 李晓丽, 曾光明. 长沙市城市生态用地定量分析及优化研究[D]. 湖南大学, 2010: 1-63.
- [19] 朱战强, 杨帆, 宋志军. 北京生态用地的空间格局及复杂性[J]. *经济地理*, 2015, 35(7): 165-175
- [20] Klijn F, de Haes H A U. A hierarchical approach to ecosystems and its implications for ecological land classification [J]. *Landscape Ecology*, 1994, 9(2): 89-104.
- [21] Zonneveld I S. Scope and Concepts of Landscape Ecology as an Emerging Science [M]. Springer New York, 1990: 3-20.
- [22] 李超, 杜哲, 陈亚恒, 等. 环京津地区土地生态服务价值时空分异特征[J]. *土壤通报*, 2015, 46(1): 42-47.
- [23] 李洪远. 基于遥感和GIS的天津滨海新区30年间生态用地变化分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(1): 75-80.
- [24] 喻锋, 李晓波, 张丽君, 等. 中国生态用地研究:内涵、分类与时空格局[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4931-4943.

- [25] 周焱, 蔡学成, 谢元贵, 等. 典型岩溶地区生态用地研究-以清镇市为例[J]. 中国土地科学, 2006, 20(5): 38-41.
- [26] 刘芳, 张红旗. 塔里木盆地生态用地分类及其时空变化研究[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 825-836.
- [27] 喻锋, 李晓波, 王宏, 等. 基于能值分析和生态用地分类的中国生态系统生产总值核算研究[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1663-1675.
- [28] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 等. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法-以渤海湾沿岸为例[J]. 地理研究, 2012, 31(10): 1775-1784.
- [29] 张彪, 徐洁, 王硕, 等. 首都生态圈土地覆被及其生态服务功能特征[J]. 资源科学, 2015, 37(8): 1513-1519.
- [30] 俞炜炜, 陈彬, 张珞平. 海湾围填海对滩涂湿地生态服务累积影响研究-以福建兴化湾为例[J]. 海洋通报, 2008, 27(1): 88-94.
- [31] 吴岚, 张小林. 国内外生态用地研究: 概念·分类与应用[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(28): 197-199, 205.
- [32] 李强, 王士君, 梅林. 长春市中心城区大型超市空间演变过程及机理研究[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 553-561.
- [33] 段增强, P.H.Verburg, 张凤荣, 等. 土地利用动态模拟模型的构建及其应用-以北京市海淀区为例[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 1037-1047.
- [34] Syphard A D, Clarke K C, Franklin J. Using a cellular automaton model to forecast the effects of urban growth on habitat pattern in southern California [J]. *Ecological Complexity*, 2005, 2(2): 185-203.
- [35] 马晴, 李丁, 廖杰, 等. 疏勒河中下游绿洲土地利用变化及其驱动力分析[J]. 经济地理, 2014, 34(1) : 148-155.
- [36] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [37] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24: 107-127.
- [38] 蔡芳芳, 濮励杰. 南通市城乡建设用地演变时空特征与形成机理[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 731-740.
- [39] 杨忍, 刘彦随, 龙花楼. 基于格网的农村居民点用地时空特征及空间指向性的地理要素识别[J]. 地理研究, 2015, 34(6): 1077-1087.
- [40] 卢霞, 谢宏全. 基于 RS 的连云港海岸带生态系统服务价值估算[J]. 淮海工大学学报(自然科学版), 2010, 19(2): 85-88.
- [41] 索安宁, 于永海, 韩富伟. 环渤海海岸带生态服务价值功能评价[J]. 海洋开发与管理, 2011, (7): 67-73.
- [42] Ying Li, Yu Feng, Xiaorong Guo, et al. Changes in coastal city ecosystem service values based on land use—A case study of Yingkou, China [J]. *Land Use Policy*, 2017, 65: 287-293.
- [43] 郭军, 任国玉, 任雨. 近 100 年天津平均气温与极端气温变化[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1399-1405.
- [44] 张兵, 王中良. 天津地区降水和气温的变化趋势及多尺度交叉小波分析[J]. 天津师范大学学报(自然版), 2016, 36(1): 32-39.