

DOI: 10.5846/stxb202201280269

任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 孙嵩松, 赵林峰, 梁迅, 曾莉. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响. 生态学报, 2023, 43(11): 4473-4487.

Ren Y M, Liu X P, Xu X C, Sun S S, Zhao L F, Liang X, Zeng L. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST Model. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4473-4487.

基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响

任胤铭¹, 刘小平^{1,2,*}, 许晓聪¹, 孙嵩松¹, 赵林峰³, 梁 迅⁴, 曾 莉¹

1 中山大学地理科学与规划学院, 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275

2 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519080

3 广州市城市规划勘测设计研究院, 广州 510060

4 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430078

摘要: 研究未来不同情景下土地利用变化对区域生态系统服务的影响, 可以为城市可持续发展的规划和决策提供有效支持。以京津冀城市群为研究区域, 首先利用未来土地利用模拟(FLUS)模型模拟 2045 年自然发展情景、耕地保护情景和生态保护情景下的土地利用空间分布格局, 并结合 InVEST 模型模拟研究区不同情景下的生境质量、产水量、碳储量、土壤保持量和水质净化服务, 在此基础上运用层次分析法构建综合生态系统服务指数(CES), 从空间上反映多种生态系统服务的供给总量, 研究不同情景下土地利用变化对生态系统服务功能的影响。研究结果表明: ① FLUS 模型的模拟精度较高, 适用于研究区的土地利用模拟。② 在生态保护情景下, 除产水量相比 2015 年下降 2.47% 外, 其他几种生态系统服务均有最大幅度的上升, 且这 4 种生态系统服务在西北山区都出现增加的现象; 自然发展情景下, 城镇用地和农村居民点的扩张引发了大量的碳储量和生境质量损失; 耕地保护情景下, 水质净化能力出现最大程度的下降。③ 自然发展情景下京津冀区域 CES 的损失最大。CES 下降幅度最大的区域主要发生在林地被城镇用地侵占, 其次是林地被农村居民点侵占的地区, 导致生境质量、碳储量和水质净化能力同时下降; 在生态保护情景下, 林地的增加促进了多种生态系统服务功能同时提升, 京津冀区域的 CES 大幅提高, 表明生态保护情景是最有利于可持续发展的土地利用方案。但同时需注意大量造林可能带来的水资源短缺, 要因地制宜保护生态环境。研究结果可以为京津冀城市群可持续发展政策的制定提供参考依据, 为研究未来不同政策情景下土地利用变化对生态系统服务的影响提供新思路。

关键词: 未来土地利用模拟(FLUS)模型; InVEST 模型; 京津冀城市群; 土地利用模拟; 生态系统服务

Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST Model

REN Yinming¹, LIU Xiaoping^{1,2,*}, XU Xiacong¹, SUN Songsong¹, ZHAO Linfeng³, LIANG Xun⁴, ZENG Li¹

1 School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China

3 Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China

4 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

Abstract: Examining the impacts of land use change on regional ecosystem services (ESs) under different scenarios in the future can provide effective support for the planning and decision-making of sustainable urban development. Taking Beijing-

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171409)

收稿日期: 2022-01-28; **网络出版日期:** 2023-02-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxp3@mail.sysu.edu.cn

Tianjin-Hebei (BTH) Urban Agglomeration as the study area, we first used the future landuse simulation (FLUS) model to simulate the land use pattern in 2045 under three different scenarios, covering nature development scenario (ND), the cultivated land protection scenario (CP), and ecological protection scenario (EP). Subsequently, we evaluated the habitat quality (HQ), water yield (WY), carbon storage (CS), soil retention (SR) and water purification capacity (WP) ESs by combining the FLUS and InVEST models. On this basis, a comprehensive ecosystem service index (CES) was developed by the analytical hierarchical process (AHP) to reflect the total supply of multiple ESs in space and determine the impact of landuse change on ESs under different scenarios. Results show that: ① FLUS model has high simulation accuracy and is suitable for landuse simulation in BTH. ② Under the EP scenario, except that the amount of WY declined by 2.47% compared to that in 2015, the rest four ESs increased significantly. The increased area was mainly found in the northwest mountainous area; Under the ND scenario, the expansion of urban land and rural settlements caused a large loss of CS and HQ; Under the CP scenario, the WP decreased significantly. ③ Under the ND scenario, the CES in BTH region suffered the greatest loss. The area with the most serious decline was mainly caused by the conversion of forest land to urban land and rural settlements, followed by the conversion of forest land to rural settlements, leading to HQ, CS and WC declining simultaneously. Under the EP scenario, the increase in forest land area promoted the simultaneous improvement of multiple ESs, and the CES in BTH region increased significantly, indicating that the EP scenario is the most conducive landuse scheme for sustainable development. While at the same time, attention should be paid to the possible shortage of water resources caused by a large number of afforestation, and the ecological environment should be protected according to local conditions. Our findings can provide reference for the formulation of regional sustainable development policies in BTH region, and provide new ideas for determining the impact of landuse change on ESs under different policy scenarios in the future.

Key Words: the future landuse simulation (FLUS) model; InVEST model; Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration; land use simulation; ecosystem services

土地利用/覆被变化(LUCC)是直接影响生态系统服务的最重要因素^[1-2]。在中国,快速的城市化导致了一系列问题,如水质恶化、碳储量减少和生物多样性减少,不仅威胁着城市的可持续发展,也危害着城市居民的健康^[3]。京津冀作为全国三大城市群之一,自改革开放以来经济高速发展,城市化和工业化进程迅速,区域内土地利用类型变化显著,生态系统服务功能遭到严重破坏。有研究表明,京津冀城市群 1988—2008 年的城市扩张已经导致该地区的几种重要生态系统服务功能显著下降^[4]。相比于长三角和珠三角,京津冀城市群的生态系统服务功能退化最为显著^[5]。2015 年国家发布了《京津冀协同发展规划纲要》,明确了生态环境保护的重要性。因此评估京津冀城市群未来土地利用变化及其对生态系统服务功能的潜在影响,对该地区的可持续发展具有重要意义。

目前许多研究侧重分析建设用地扩张对生态系统服务的影响,且大部分研究将城镇用地、农村居民点和其他建设用地合并为一类建设用地来模拟^[6-7],鲜有研究将其分开来模拟并探究其对生态系统服务的影响。而城镇用地和农村居民点的发展模式及其某些生态系统服务功能是有差别的^[8],因此有必要将其分开来模拟。许多研究聚焦于研究历史和现状的土地利用对生态系统服务的影响^[9-12],存在一定的滞后性。一些研究仅探讨在现有趋势下的土地利用变化及其对生态系统服务的影响,未结合国家政策探究其他情景下的变化^[7]。总体来看,目前精细刻画京津冀城市群多类用地在未来不同情景下的土地利用变化及其对多种生态系统服务功能及其总体水平的影响的相关研究还尚不多见。

自 20 世纪以来,许多土地利用变化模型被提出,其中由 Liu 等^[13]提出的 FLUS 模型适用于多情景、多尺度和高精度的复杂土地利用模拟^[14]。生态系统服务是维持人类生存和可持续发展的资源,是人类直接或间接从生态系统中获得的产品和服务^[15-16],在维护生态安全、促进可持续发展和保障人类福祉等方面发挥着重要作用^[15]。目前已有许多评估生态系统服务的方法,其中 InVEST 模型可实现对多种生态系统服

务的定量分析、空间分布和动态变化制图,揭示生态系统服务在未来不同情景下的变化^[17]。

基于此,本文利用 FLUS 模型模拟预测京津冀城市群在 2045 年自然发展、耕地保护及生态保护情景下的土地利用空间分布格局,将建设用地细分为城镇用地、农村居民点和其他建设用地来模拟。在此基础上运用 InVEST 模型预测量化未来区域生境质量、产水量、土壤保持量、碳储量和水质净化 5 种生态系统服务,并运用层次分析法构建用于比较不同情景下多种生态系统服务总体水平的综合生态系统服务指数,进一步分析未来不同情景下京津冀区域及各市的多种生态系统服务及其供给总量的变化,探讨土地利用变化对生态系统服务的影响,为土地利用决策提供信息,为生态安全保障提供参考。

1 研究区与研究数据

1.1 研究区概况

京津冀为北京市、天津市和河北省的简称,位于东经 113°04′—119°53′,北纬 36°01′—42°37′之间,总面积 21.8 万 km²^[18](图 1)。京津冀作为我国第三大城市群,是国家的政治、文化、国际交流和科技创新中心。截止到 2015 年,京津冀常住人口为 1.11 亿,占全国总人口的 8.13%,城镇人口 6967 万,人口城镇化率达到 62.5%,国内生产总值(GDP)为 69313 亿元,占全国的 10.24%^[19]。冬天寒冷干燥,夏天闷热多雨,属于大陆性半干旱季风气候^[20]。地势西北高东南低,地形以平原为主,分布有丘陵、盆地、山区和高原等多种地貌类型。

1.2 数据来源

研究中的两期土地利用数据(2000 年和 2015 年)来源于中科院资源环境数据共享中心,空间分辨率为 30m×30m。每期数据在原数据的基础上进一步划分为 8 类:耕地、林地、草地、水域、城镇用地、农村居民点、其他建设用地和未利用土地。土地利用变化与自然环境、交通区位、社会经济及政策紧密相关,本文驱动土地利用变化的空间变量主要有自然因素(数字高程模型(DEM)、坡度和坡向)、交通区位因素(距市中心、城镇中心、河流、铁路和高速公路的距离)和社会经济因素(人口和 GDP),如图 2 所示。政策因素包括国家级自然保护区边界数据。DEM 数据来自地理空间数据云,坡度和坡向根据 DEM 提取得到。2015 年 GDP 和人口网格插值数据、国家级自然保护区边界数据和中国 1980—2015 年年降水量空间插值数据集来源于中科院资源环境数据共享中心。水系、道路、行政境界(点)数据来源于全国地理信息资源目录服务系统。蒸散量采用全球干旱指数和潜在蒸散发气候数据库的 1970—2000 年年均潜在蒸散发数据集。土壤数据来自世界土壤数据库(HWSD)。多年降雨侵蚀力栅格数据和土壤可蚀性数据来源于国家地球系统科学数据中心。所有栅格数据的分辨率都统一为 300m×300m,坐标系重投影为 WGS1984_UTM_ZONE_50N,栅格范围保持一致。

2 研究方法

2.1 土地利用变化模拟

2.1.1 情景设计

参考相关文献^[21—23],综合考虑京津冀当前发展情况和未来社会经济发展规划,利用 Markov 模型设计了 3 种情景:自然发展情景、耕地保护情景和生态保护情景。其中自然发展情景 2015—2045 年各地类转移概率

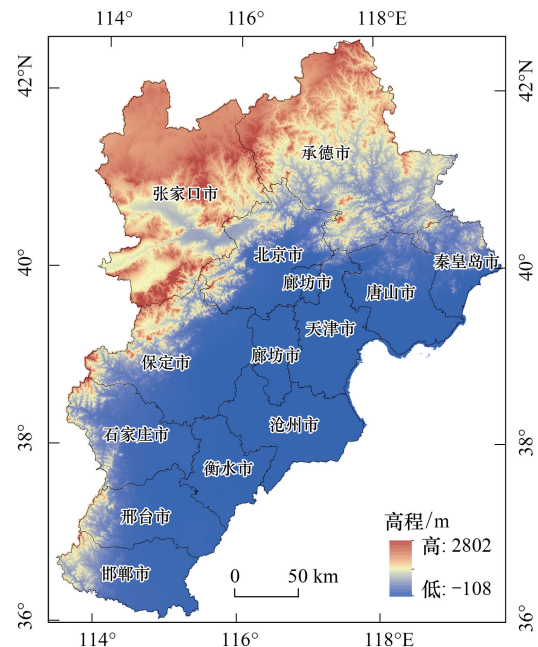


图 1 研究区位置及地形

Fig.1 Location and topography of study area

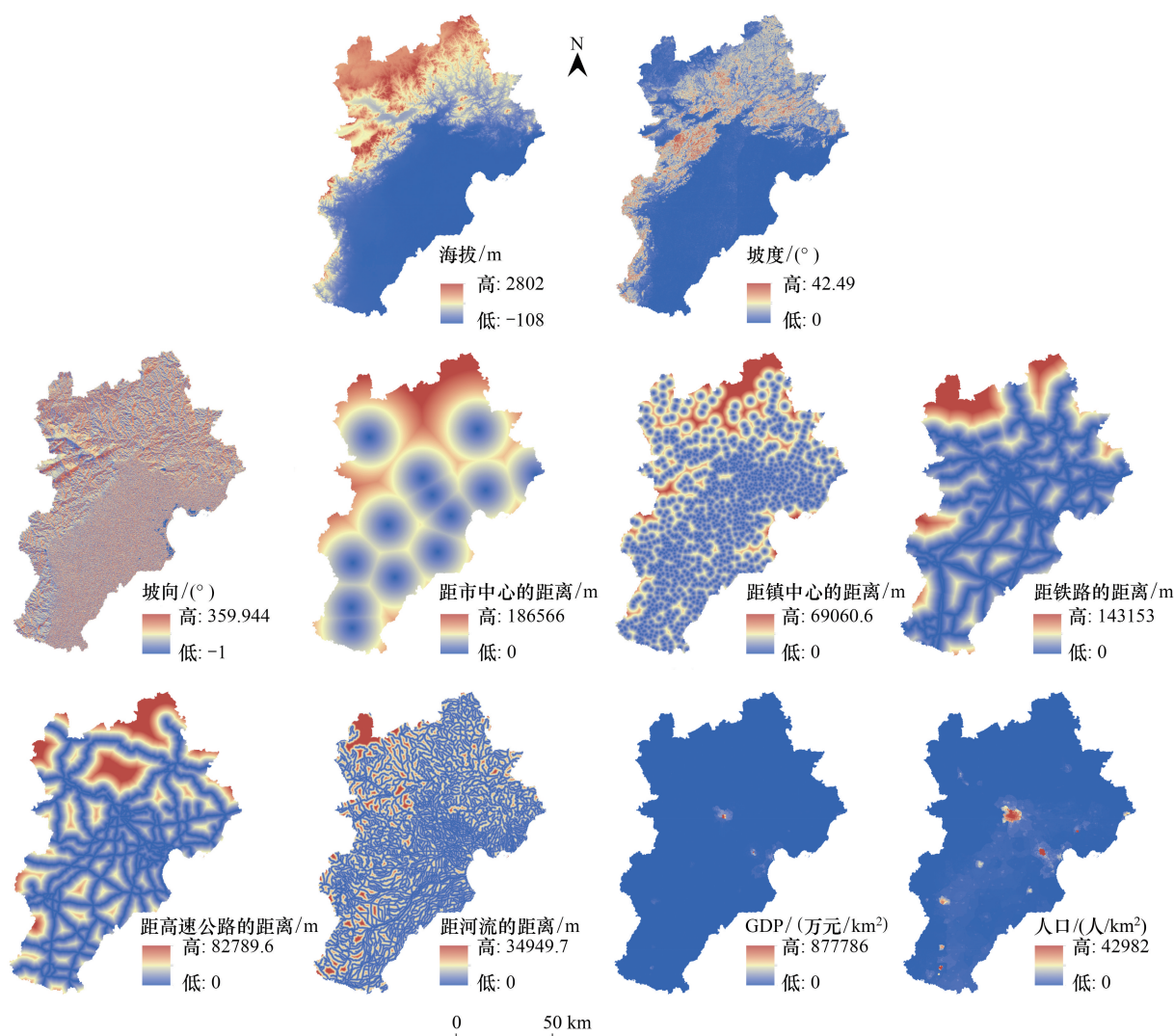


图2 京津冀城市群城市扩张模拟的空间变量

Fig.2 Spatial variables of urban expansion simulation in BTH urban agglomeration

保持 2000—2015 年的水平。参考京津冀城市群目前已经公开的最新版区域土地利用规划:《北京城市总体规划(2016—2035)》《天津城市规划(2015—2030)》《河北省土地利用总体规划(2006—2020 年)》和《京津冀地区林业生态促进框架协议》,参照前人对 Markov 过程转移概率修正的相关研究成果^[24—27],对 2000—2015 年的土地利用转移概率矩阵进行调整,以创建耕地保护情景和生态保护情景的土地利用需求。耕地保护情景旨在模拟耕地保护政策和耕地复垦活动可能产生的影响和环境效应,耕地面积不低于 2020 年规划耕地保有量及中高产耕地面积^[23,28]。城镇用地、农村居民点和其他建设用地不超过 2020 年规划用地面积。减少耕地向城镇用地、农村居民点和其他建设用地转移的概率,增加草地、城镇用地、农村居民点和未利用地向耕地转移的概率。生态保护情景注重保护生态用地,耕地面积不少于 2020 年规划耕地保有量及中高产耕地面积,林地面积不少于 2020 年规划面积,城镇用地、农村居民点和其他建设用地面积不超过 2020 年规划面积。减少林地向其他地类转移的概率,增加除水域外其他地类向林地转移的概率。

2.1.2 土地利用变化模拟

本文运用 FLUS 模型耦合 Markov 模型模拟预测京津冀城市群 2045 年 3 种不同情景下的土地利用空间分布格局。FLUS 模型是由 Liu 等^[13]基于传统元胞自动机原理进行改进开发的,原理是在利用人工神经网络算

法对基期土地利用数据和各驱动因子数据进行运算的基础上,估算出区域内各地类的发展概率,然后将发展概率与邻域影响因子、自适应惯性系数和转换成本结合,得出元胞的总体转换概率,经过轮盘竞争机制最终得出模拟结果。基于神经网络的适宜性概率计算和自适应惯性竞争机制原理本文不再详细阐述,具体参考文献表述^[13]。

(1) 邻域影响因子

邻域影响因子反映不同地类之间以及邻域范围内不同地类单元间的相互作用,取值在 0 到 1 之间,越接近 1 则代表该用地类型的扩张能力越强。采用 3×3 的摩尔邻域作为邻域范围。参考相关研究^[23,29-31],经过多次测试和调整,最终确定各地类的邻域影响因子参数如表 1 所示:

表 1 邻域因子参数
Table 1 Neighborhood factor parameters

土地利用类型 Land use types	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Waters	城镇用地 Urban land	农村居民点 Rural settlements	其他建设用地 Other construction land	未利用土地 Unused land
自然发展情景 Nature development scenario	0.5	0.7	0.3	0.4	1	0.8	0.9	0.01
耕地保护情景 Cultivated land protection scenario	0.8	0.5	0.3	0.2	0.8	0.6	0.7	0.01
生态保护情景 Ecological protection scenario	0.3	1	0.7	0.5	0.8	0.6	0.7	0.01

(2) 转换成本与限制变化区域设置

转换成本用来表征从当前地类转换为需求类型的困难程度。通过分析 2000—2015 年京津冀地区的土地利用转移矩阵,发现所有土地利用转换都是可能的^[32-33]。本文根据设置的 3 种情景设计了 3 种不同的转化成本。在自然发展情景下,禁止城镇用地和其他建设用地转变为其他地类。在耕地保护情景下,禁止耕地转变为其他地类,禁止城镇用地转变为其他地类。前两种情景中,均设置水面为限制变化区域。生态保护情景下,禁止林地转变为其他地类,同时将国家级自然保护区设置为限制变化区域。

2.2 生态系统服务功能评估方法

本文采用 InVEST 模型定量估算京津冀生境质量、土壤保持、产水、固碳和水质净化服务。生境质量利用 InVEST 模型中的生境质量模块评估。该模块反映了人类活动对环境造成的影响,人类活动强度越大,生境所受到的威胁越大。本文参考相关研究^[34]选择耕地、建设用地和未利用土地作为胁迫因子,将林地、草地和水域定义为生境。参考 InVEST 模型用户手册^[35]和相关研究^[9-10]确定模型的各项参数;年平均土壤保持量采用 InVEST 模型中的泥沙保留模块计算。各参数根据相关参考文献设置^[36-37];产水服务用 InVEST 产水量模块计算得到,该模块是基于水量平衡原理,用各栅格的降水量减去实际蒸散发的水量,进而得到该栅格的产水量^[35]。年降水量采用 1980—2015 年的降水量平均值。生物系数表的各参数根据相关参考文献设置^[3,36,38]。Z 值为表征降雨特征的季节性因子,经过多次模拟,发现当 Z 值取 3.22 时模型的准确度较高,模拟结果与 2015 年政府水资源公报中京津冀地区水资源总量 174.67 亿 m³最为接近,相对误差为 0.20%;固碳服务利用 InVEST 模型碳储量模块计算,具体原理及计算方法见参考文献^[35,37]。不同地类的平均碳密度参考相关研究^[37,39];水质净化服务用 InVEST 模型的“水质净化”模块计算得到,模型需要的参数参考相近研究区域的研究设置^[3,40-41]。该模块首先确定流域内每个栅格污染物的持留量,然后计算流域内总污染负荷及平均污染负荷,氮输出量越小,水质净化服务越高^[35]。

2.3 综合生态系统服务指数

为反映和量化多种生态系统服务的总影响,本文构建了综合生态系统服务指数(CES)^[42-44]。在许多研

究中^[44-45],所有生态系统服务被赋予了相等的权重,但实际上不同生态系统服务功能的重要性是不同的。本文在借鉴前人研究^[3]的基础上,运用层次分析法(AHP)构建CES,用于比较不同情景下多种生态系统服务的总体水平。该指标可以从空间上反映城市生态系统总体状况,为政府制定城市规划政策提供参考。综合生态系统服务指数CES的计算公式如下:

$$CES_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_{ij} \tag{1}$$

CES_j 是第 j 年的综合生态系统服务指数; w_i 是第 i 种生态系统服务的权重; S_{ij} 是第 j 年的第 i 种生态系统服务的归一化值; n 是生态系统服务的种类数。本文对影响层和指标层中的元素进行两两比较来构建判断矩阵,选择几何平均法、算术平均法、特征向量法和最小二乘法共 4 种方法计算权重,取所有计算方法的平均值作为最终权重。表 2 为 AHP 确定的各类生态系统服务的权重。

表 2 京津冀城市群不同生态系统服务指标的权重
Table 2 Weights of various ES indicators for BTH urban agglomeration

影响层 Affected layers	影响层权重 The weight of the affected layer	指标层 Index layers	指标层权重 The weight of the index layer	最终权重 Ultimate weight
调节服务 Regulating services	0.53	水质净化(氮输出量)	0.22	0.12
		碳储存	0.46	0.24
		土壤保持	0.32	0.17
供应服务 Supplying services	0.25	产水量	1	0.25
支持服务 Supporting services	0.22	生境质量	1	0.22

3 结果与分析

3.1 2015—2045 年京津冀土地利用变化特征

利用 2000 年和 2015 年两期土地利用数据,模拟 2015 年土地利用分布格局,并将模拟结果与 2015 年实际土地利用进行比较。本研究采用能更好标识模拟精度的 FoM 系数进行验证,计算得到 FoM 系数为 0.138,说明 FLUS 模型精度较高,可以支持 InVEST 模型开展生态系统服务模拟。

研究结果(图 3)表明耕地一直都是京津冀的主要土地利用类型,占总面积的 47.66%,在自然发展和生态保护情景下分别减少 7419.96km²(7.22%)和 17535.96km²(17.06%),在耕地保护情景下增加 12381.57km²(12.04%)。林地在生态保护情景下得到了有效的保护,面积增加了 30633.75km²(68.30%),在其他两种情景下面积减少。城镇用地、农村居民点和其他建设用地在自然发展情景下分别增加了 7472.88km²(增加了近一倍)、2636.1km²(17.04%)、703.62 km²(16.70%),3 种地类在该情景下的扩张范围最大,呈外延式和填充式扩张。城镇用地的面积在 3 种情景下均有不同程度的增加,但在耕地保护和生态保护情景下增加的面积远小于自然发展情景,表明政策使得城镇用地的不断扩张得到抑制,呈现集约化发展。由于城镇用地和农村居民点的适宜区域与耕地适宜区域高度重叠,加上北部和西部山脉的生态屏障作用,两种地类占用耕地的现象在东南部平原较为突出^[19]。生态保护情景下,农村居民点、耕地、草地、水域和未利用土地的面积减少,西部、北部山区和坝上高原的林地面积大量增加。在耕地保护情景下,位于华北平原的部分农村居民点被复垦整治为耕地,位于坝上高原的部分草地被开垦为耕地。

3.2 2015—2045 年京津冀不同情景下生态系统服务变化

3.2.1 生态系统服务供给量变化

研究结果(表 3)表明京津冀地区的土壤保持量在耕地保护情景下减少了 3×10⁷t,在自然发展情景下增加了 2.8×10⁷t,在生态保护情景下增加得最多,为 1.11×10⁸t。京津冀地区的生境质量在自然发展情景下和耕地保护情景下分别从 0.548 降低到 0.522 和 0.539;在生态保护情景下,上升到 0.620。京津冀地区的年产水量在

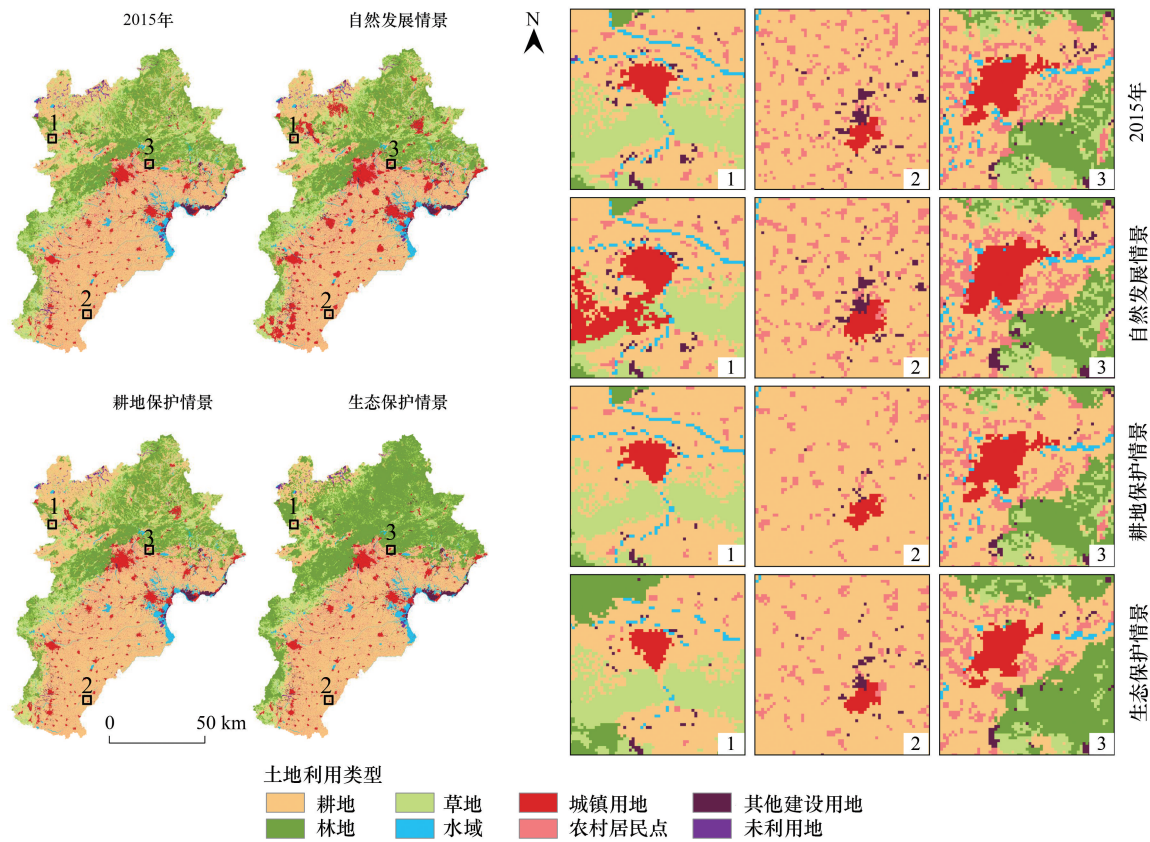


图3 2015年和2045年3种不同情景下土地利用模拟图

Fig.3 Reference map for 2015 and simulated land use map under three scenarios for 2045

自然发展情景和耕地保护情景下分别增加了 $9.3\times10^7\text{ m}^3$ 和 $2.39\times10^8\text{ m}^3$, 在生态保护情景下减少了 $4.32\times10^8\text{ m}^3$ 。京津冀地区的碳储量在生态保护情景下和耕地保护情景下分别增加了 $5.66\times10^8\text{ t}$ 和 $1.6\times10^7\text{ t}$, 在自然发展情景下减少了 $1.04\times10^8\text{ t}$ 。京津冀地区的氮输出量在自然发展情景下减少了 $5.53\times10^3\text{ t}$, 在生态保护情景下减少的最多, 为 $17.41\times10^3\text{ t}$, 在耕地保护情景下增加了 $11.64\times10^3\text{ t}$ 。

表3 2015年和2045年3种不同情景下的生态系统服务供给及其相对变化百分比

Table 3 The supply of multiple ecosystem service for 2015 and 2045 under three different scenarios and its relative changes										
指标 Indicators	产水量 Water yield/ (10^8 m^3)	变化率 Change rate/%	土壤保持量 Sediment retention/ (10^8 t)	变化率 Change rate/%	生境质量 Habitat quality	变化率 Change rate/%	碳储量 Carbon storage/ (10^8 t)	变化率 Change rate/%	氮输出 N itrogen export/ (10^3 t)	变化率 Change rate/%
2015 年现状 Current status in 2015	175.02		61.47		0.548		39.86		112.25	
自然发展情景 Nature development scenario	175.95	0.53	61.75	0.46	0.522	-4.74	38.82	-2.61	106.72	-4.93
耕地保护情景 Cultivated land protection scenario	177.41	1.37	61.17	-0.49	0.539	-1.64	40.02	0.40	123.89	10.37
生态保护情景 Ecological protection scenario	170.70	-2.47	62.58	1.81	0.620	13.14	45.52	14.20	94.84	-15.51

研究结果(表 3)表明在自然发展情景下,生境质量和碳储量均大幅度下降,产水量、土壤保持量和水质净化能力有所上升。在耕地保护情景下,土壤保持量、生境质量和水质净化能力均有所下降,而产水量增加最多,碳储量有略微增加。在生态保护情景下,除产水量有所下降外,生境质量、水质净化能力、碳储量和土壤保持量均有所上升,且是 3 种情景中上升幅度最大的。

3.2.2 生态系统服务空间分布格局变化

本研究绘制了 2015 年生态系统服务及其在未来 3 种情景下变化的空间分布格局(图 4)。研究结果表明京津冀生境质量和碳储量的空间分布格局较为相似,高值均分布在植被覆盖率较高的东北和西南地区,低值

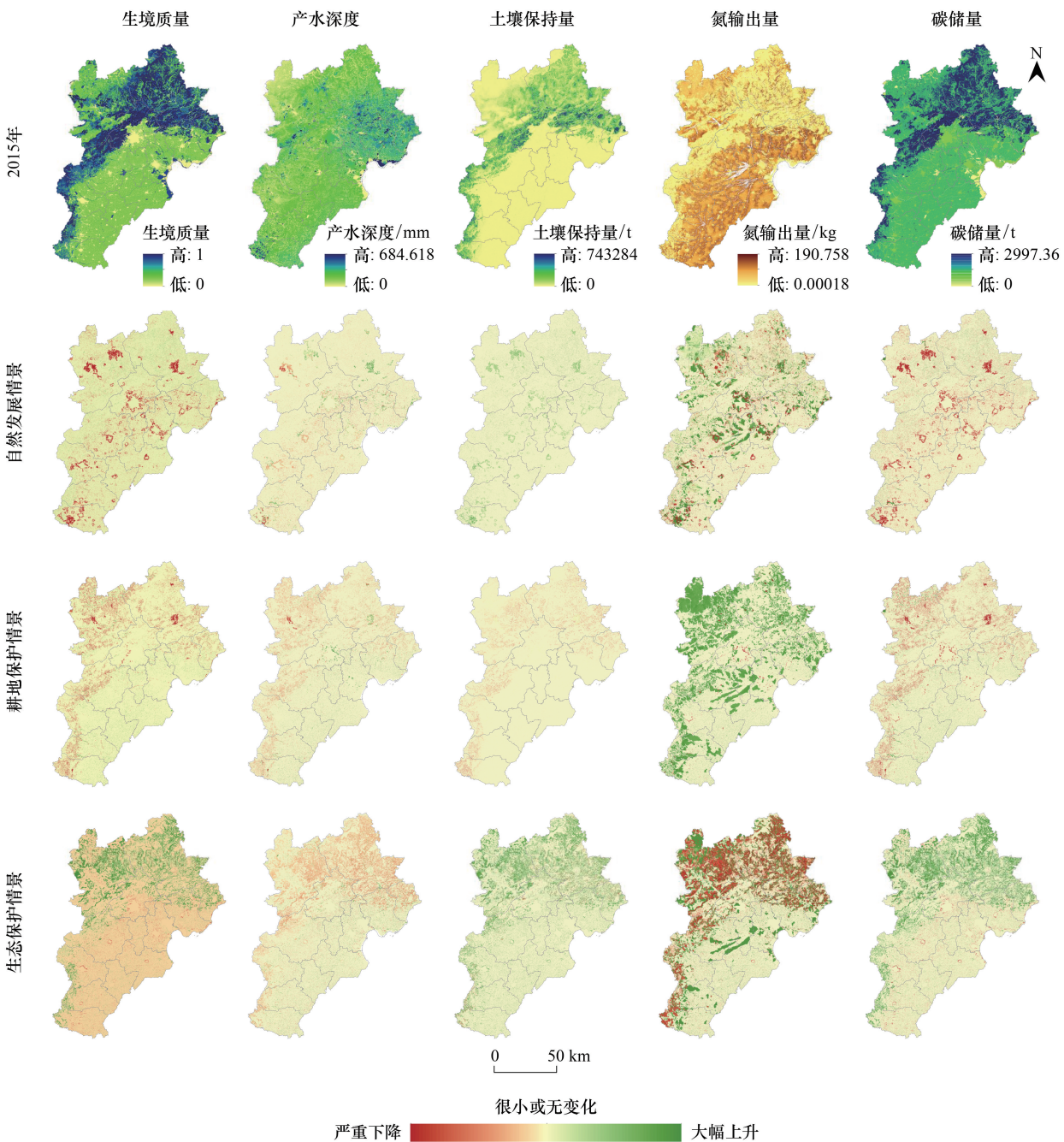


图 4 2015 年生态系统服务空间分布和 2045 年 3 种不同情景下生态系统服务变化空间分布图

Fig.4 Temporospatial distribution of ecosystem services in the study region for 2015 and its change in 2045 under three different scenarios

分布在人口密集的城区,耕地的碳储量处于中等水平;土壤保持量高值分布在太行山、燕山山区及其以北的林地和草地,其他区域较低。这 3 种生态系统服务的高值区均是植被覆盖率较高的地区。产水量的空间分布格局与降水量有关,高值主要分布在京津冀东北部沿海地区,与前人的研究结论相印证^[46],低值主要分布在东南部平原和西北部山区。氮输出量低值主要分布在西北山区,与林地和草地的分布基本一致;高值主要分布在耕地集中的东南部平原地区。

在自然发展情景下,生境质量和碳储量在各市中心城区周围退化最严重,沿太行山脉和燕山山脉一带也有退化的现象。这是因为城镇用地和农村居民点大量扩张侵占耕地、林地和草地,导致生境质量和碳储量显著下降。而土壤保持量则在这些地区呈现出了增加的趋势。产水量则是在东部呈现出了增加的趋势,西部则反之。产水量增加主要发生在城区周围被城镇用地扩张侵占的地区,这是因为城镇用地不透水面比例高,蒸散发量低^[47-48],以及发生在部分毁林造田和退耕还草的地区,这是因为树木的蒸散量比较大,导致林地的产水量较少。在耕地保护情景下,除水质净化能力严重下降外,各城市周边生态系统服务的退化情况相比自然发展情景大大减弱;在生态保护情景下,生境质量、土壤保持量、水质净化能力、碳储量上升以及产水量下降的区域主要分布在太行山山脉以西、燕山山脉以北、坝上高原、秦皇岛中部和唐山北部山区,在这些地区有许多耕地、草地和未利用地转为林地。

3.3 2015—2045 年不同情景下综合生态系统服务指数变化

3.3.1 京津冀综合生态系统服务指数平均值变化

CES 平均值可以反映生态系统服务的总体供给状态,2015 年京津冀 CES 平均值为 0.369,在自然发展情景和耕地保护情景下 CES 平均值分别为 0.361(下降 2.17%)、0.364(下降 1.36%);在生态保护情景下,CES 平均值为 0.407(上升 10.30%),表明生态系统服务总体水平有所提高。

研究结果(图 5)表明承德、秦皇岛、北京、张家口和保定的 CES 平均值较高,形成京津冀城市群的一道绿色生态屏障,林地和草地也主要分布于这几个市。而天津、沧州、廊坊和衡水等城市林草覆盖率较低,CES 平均值也较低。在自然发展情景下,所有市的 CES 平均值均降低,其中邯郸市下降程度最大。在耕地保护情景下,仅衡水市、沧州市、廊坊市和天津市有轻微上升,其他市的 CES 平均值均下降,其中张家口下降幅度最大。在生态保护情景下,所有市的 CES 平均值均上升,其中张家口上升幅度最大。

3.3.2 京津冀综合生态系统服务指数空间变化特征

研究结果(图 6)表明各城市中心城区城镇用地、农村居民点及其他建设用地的 CES 较低,而太行山、燕山区域林地和草地的 CES 较高。为了更清楚的反映京津冀不同情景下 CES 的空间变化,对前后两个时期的 CES 分布图进行栅格减法运算,将变化值介于 ± 0.001 之间的定义为基本不变区域^[49],并结合自然断点法对变化值分为七级:严重下降(< -0.34)、中度下降($-0.34 \sim -0.19$)、轻度下降($-0.19 \sim -0.001$)、基本不变($-0.001 \sim 0.001$)、轻度上升($0.001 \sim 0.22$)、中度上升($0.22 \sim 0.36$)、大幅上升(> 0.36)。

在自然发展情景下,CES 下降区域最多,占总面积的 14.86%,主要分布在北京城区周边、廊坊市、天津市、唐山市、秦皇岛市、张家口西北部、承德市、邯郸市和太行山以东的浅山丘陵地区,主要是城镇用地和农村居民点扩张造成的。在耕地保护情景下,CES 下降区域面积减少,仅占 11.21%,基本不变区域最多(85.85%)。在生态保护情景下,CES 上升区域最多,占 22.79%,主要分布在张家口市、承德市和秦皇岛市,严重退化和中度退化区域很少。

研究结果(图 7)表明,北京市在自然发展情景和耕地保护情景下 CES 严重下降区域面积占比均位居首位;张家口市和承德市的 CES 中度下降区域的面积占比分别在自然发展情景和耕地保护情景下位居第一;邯郸市和张家口市分别在自然发展情景和耕地保护情景下 CES 下降区域总面积占比最多,均以轻度下降为主。在生态保护情景下,北京市 CES 大幅上升等级面积占比最高,张家口市和承德市 CES 上升总面积占比位居前两名,远超其他各市。

3.3.3 各情景下土地利用变化对生态系统服务的影响

将 CES 变化和土地利用变化、生态系统服务变化分别进行叠置分析,发现自然发展情景下 CES 严重下降

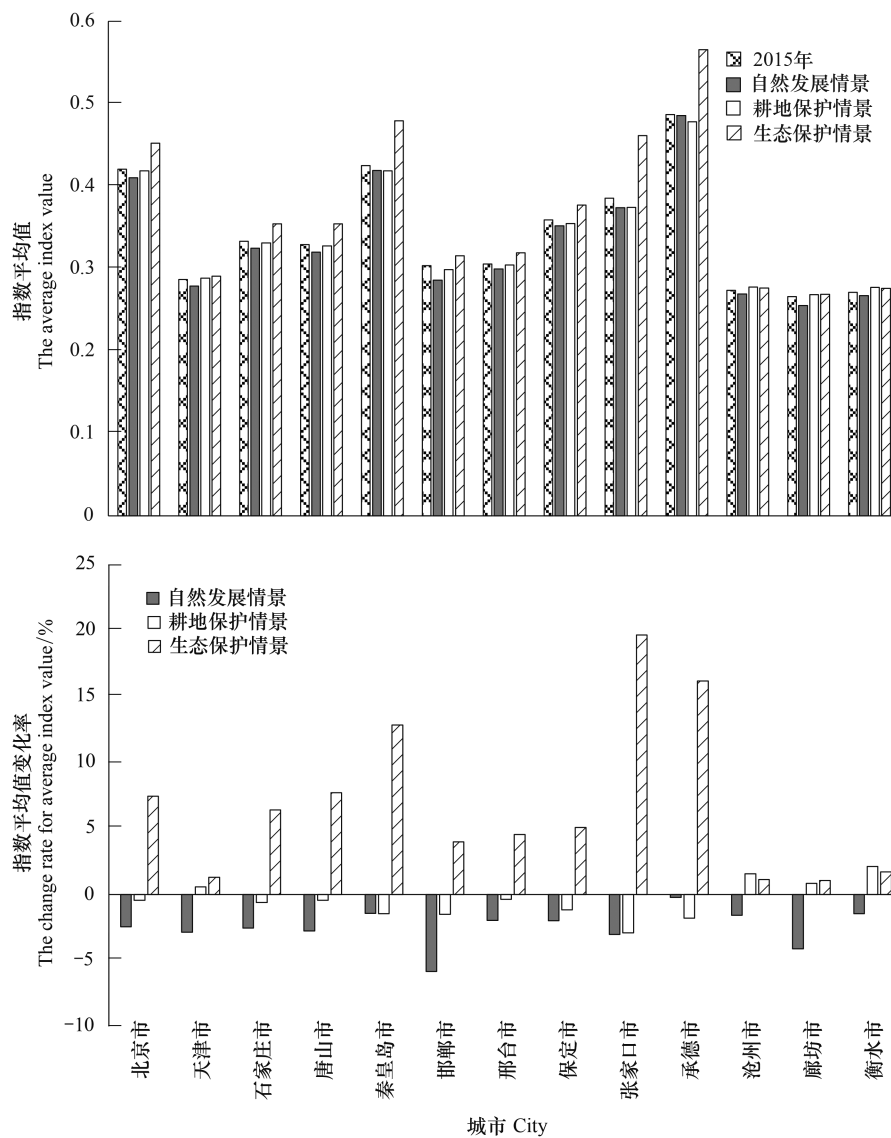


图5 2015年到2045年3种情景下京津冀各市综合生态系统服务指数及其变化率

Fig.5 The comprehensive index for ES at the municipal scale for 2015 and 2045 under three different scenarios and its relative changes

主要发生在林地被城镇用地侵占的地区,其次是被农村居民点侵占的地区,引起的主要是生境质量、碳储量和水质净化能力的同时下降,产水量、生境质量、碳储量和水质净化能力同时下降次之。CES 中度下降主要发生在草地被城镇用地侵占的地区,引起的主要是产水量、生境质量、碳储量和水质净化能力的同时下降,生境质量、碳储量和水质净化能力同时下降次之。CES 下降区域中轻度下降区域占比最多,主要是耕地被城镇用地和农村居民点侵占引起其周围未被侵占的耕地生境质量下降。在自然发展情景下,张家口市复合5种生态系统服务下降地区的面积最多,为624.24km²,承德市次之(201.15km²)。

耕地保护情景下 CES 严重下降主要发生在林地被城镇用地侵占的区域,其次是被农村居民点侵占的地区。中度下降主要发生在草地被城镇用地侵占的区域,主要是碳储量、水质净化能力和生境质量同时下降。轻度下降区域面积最多,主要发生在草地被耕地侵占的区域,主要是水质净化能力下降,其次是5种生态系统服务同时下降。上升区域以轻度上升为主,主要是产水量、生境质量和碳储量上升,地类转换主要为农村居民点被整治复垦为耕地。

生态保护情景下 CES 严重下降区域和中度下降区域极少,轻度下降区域以产水量、碳储量和生境质量的同时下降为主,以耕地被农村居民点侵占区域面积最多。CES 上升区域面积最多,其中以轻度上升为主,以生

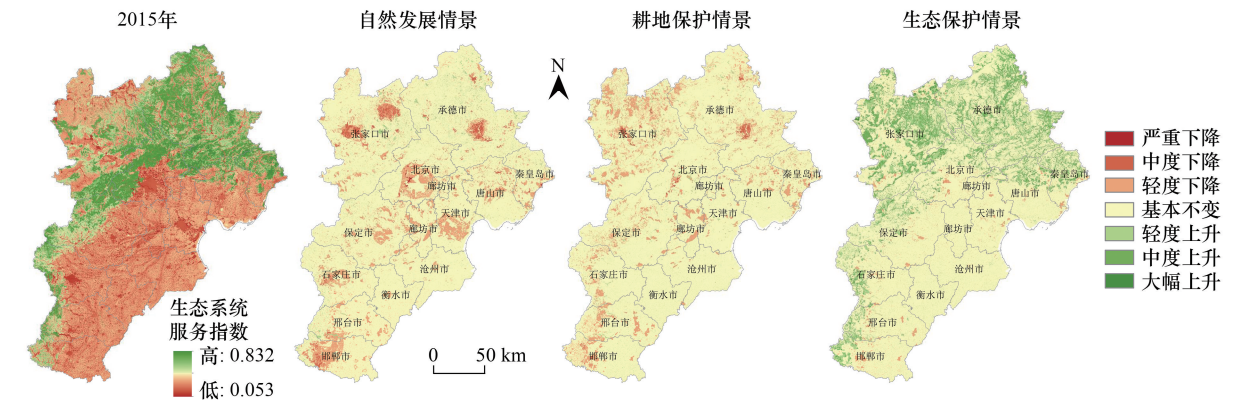


图 6 2015 年综合生态系统服务指数空间分布格局及其 3 种情景下变化空间分布

Fig.6 Temporospatial distribution of comprehensive index for ES for 2015 and 2050 under three different scenarios

The proportion of change grade for index value/% 指数变化等级面积占比	严重下降	0.81	0.09	0.05	0.13	0.49	0.05	0.09	0.10	0.11	0.13	0.04	0.36	0.00	自然发展情景
	中度下降	0.85	0.26	0.84	1.22	1.10	3.47	0.64	0.39	3.81	2.07	0.06	0.34	0.01	
	轻度下降	20.02	22.88	14.28	13.44	13.13	24.17	13.34	14.74	12.43	6.46	6.10	20.28	4.42	
	基本不变	76.95	75.53	83.35	83.70	82.83	70.65	83.55	83.26	80.63	86.17	93.06	78.57	95.04	
	轻度上升	0.85	1.20	1.14	1.40	1.84	1.52	2.13	1.22	2.43	3.48	0.73	0.45	0.52	
	中度上升	0.41	0.03	0.27	0.09	0.53	0.14	0.25	0.27	0.57	1.59	0.00	0.00	0.00	
	大幅上升	0.12	0.01	0.06	0.02	0.09	0.01	0.02	0.01	0.03	0.09	0.00	0.00	0.00	
	严重下降	0.34	0.03	0.01	0.04	0.24	0.01	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.12	0.00	耕地保护情景
	中度下降	0.58	0.20	0.28	0.63	1.08	1.02	0.31	0.26	1.02	1.38	0.08	0.59	0.01	
	轻度下降	4.92	4.49	8.05	7.20	13.68	10.59	14.28	9.94	20.92	10.03	1.89	13.10	0.51	
	基本不变	91.51	92.65	88.50	89.05	82.35	84.93	81.20	87.02	75.07	86.64	94.48	82.40	94.97	
	轻度上升	2.45	2.61	2.93	3.00	2.36	3.34	4.09	2.60	2.83	1.58	3.53	3.80	4.52	
	中度上升	0.13	0.01	0.19	0.07	0.26	0.09	0.09	0.16	0.12	0.29	0.00	0.00	0.00	
	大幅上升	0.06	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	
	严重下降	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	生态保护情景
	中度下降	0.12	0.04	0.01	0.14	0.06	0.05	0.02	0.01	0.04	0.02	0.00	0.01	0.01	
	轻度下降	3.41	4.49	3.31	3.04	3.32	5.63	5.39	3.32	2.27	0.25	1.81	2.70	1.40	
	基本不变	79.79	90.98	80.19	78.41	67.52	80.80	83.44	82.57	54.77	59.99	94.27	92.67	93.78	
	轻度上升	8.50	3.58	12.14	12.22	14.64	10.90	7.98	10.28	20.85	20.24	3.92	4.54	4.81	
	中度上升	6.17	0.61	3.40	4.76	12.76	2.29	2.83	3.45	20.56	18.17	0.00	0.06	0.00	
	大幅上升	2.01	0.30	0.95	1.43	1.70	0.33	0.33	0.37	1.50	1.33	0.00	0.02	0.00	
北京市 天津市 石家庄市 唐山市 秦皇岛市 邯郸市 邢台市 保定市 张家口市 承德市 沧州市 廊坊市 衡水市															
城市 City															

最小值 最大值

注:表中绿-黄-红色阶表征不同城市的同一CES变化等级面积占比由小至大的排序情况。

图 7 2015 年到 2045 年 3 种情景下京津冀各市综合生态系统服务指数变化等级面积占比

Fig.7 The proportion of change grade for the comprehensive index for ES at the municipal scale from 2015 to 2045 under three different scenarios

表中绿-黄-红色阶表征不同城市的同一综合生态系统服务指数变化等级面积占比由小至大的排序情况

境质量上升为主,地类转换主要为草地转林地。CES 中度上升区域次之,主要发生在退耕还林的地区。CES 大幅上升区域中以复合 4 种生态系统服务(除土壤保持量)同时上升为主,主要发生在农村居民点转变为林地的地区。林地的增加可以同时提升多种生态系统服务功能,生态系统服务之间存在协同效应,表明“退耕还林”等生态修复工程可以促进京津冀城市群的多种生态系统服务功能同时提升,生态系统服务总体水平大幅提高。

4 讨论

4.1 提升生态系统服务的城市群土地利用管理建议

分别统计了京津冀各市不同情景下几种典型的地类转换面积及其占各市总面积的百分比(表4),以探究土地利用变化对各市 CES 值的影响。结合前面分析总结的各 CES 变化等级下的主要地类变化,可以分析得出北京市、张家口和邯郸市在自然发展情景下 CES 严重下降、中度下降和总的下降地区面积占比分别位列第一的原因:北京市林地被城镇用地和农村居民点侵占的面积、比例均最高,张家口市草地被城镇用地侵占的面积、比例均最高,邯郸市耕地、林地和草地被城镇用地和农村居民点侵占的面积的比例最高。表明城镇用地和农村居民点的无序扩张会导致生态系统服务的严重下降(尤其会导致生境质量和碳储量的大幅下降,产水量的大幅上升也可能增加发生洪水和水土流失的风险。),在未来需加强对这三个市的土地利用宏观调控,继续坚持保护耕地和生态用地,控制城镇用地与农村居民点总量与新增数量^[50]。加强跨区域补偿机制的建立和完善,促进生态补偿地区可持续发展。

表 4 不同情景下京津冀各市几种典型土地利用变化面积及占该市面积百分比(km²,%)

城市 Cities	自然发展情景 Nature development scenario			耕地保护情景 Cultivated land protection scenario				生态保护情景 Ecological protection scenario	
	2 转为 5 和 6	3 转变为 5	1、2 和 3 转 为 5 和 6	2 转为 5 和 6	3 被 5 侵占	2 和 3 转 为 1	6 转为 1	新增 1	6 转变为 2
北京市	130.68 (0.80%)	38.52 (0.23%)	1059.03 (6.46%)	54.09 (0.33%)	33.66 (0.21%)	159.93 (0.98%)	145.62 (0.89%)	1920.24 (11.71%)	312.21 (1.90%)
天津市	9.72 (0.08%)	8.46 (0.07%)	746.46 (6.52%)	3.33 (0.03%)	3.42 (0.03%)	33.75 (0.29%)	198.72 (1.74%)	130.14 (1.14%)	33.57 (0.29%)
石家庄市	6.66 (0.05%)	78.12 (0.56%)	820.35 (5.90%)	1.26 (0.01%)	13.59 (0.10%)	421.92 (3.03%)	269.91 (1.94%)	1170.54 (8.42%)	129.24 (0.93%)
唐山市	16.2 (0.12%)	38.97 (0.30%)	663.03 (5.03%)	4.95 (0.04%)	14.67 (0.11%)	250.47 (1.90%)	318.87 (2.42%)	1056.06 (8.01%)	172.17 (1.31%)
秦皇岛市	33.57 (0.44%)	16.74 (0.22%)	192.06 (2.52%)	15.39 (0.20%)	9.99 (0.13%)	276.84 (3.63%)	143.64 (1.88%)	1452.87 (19.03%)	120.24 (1.57%)
邯郸市	3.51 (0.03%)	382.68 (3.23%)	1341.99 (11.31%)	1.26 (0.01%)	107.55 (0.91%)	423.27 (3.57%)	323.91 (2.73%)	502.38 (4.23%)	37.62 (0.32%)
邢台市	10.26 (0.08%)	35.64 (0.29%)	515.52 (4.17%)	2.88 (0.02%)	0.27 (0.00%)	364.32 (2.95%)	341.19 (2.76%)	538.65 (4.35%)	38.61 (0.31%)
保定市	21.24 (0.10%)	7.56 (0.03%)	967.68 (4.39%)	6.21 (0.03%)	1.17 (0.01%)	846.72 (3.84%)	379.53 (1.72%)	1708.74 (7.76%)	79.92 (0.36%)
张家口市	40.59 (0.11%)	1251.18 (3.46%)	1710.45 (4.73%)	7.65 (0.02%)	244.62 (0.68%)	2902.77 (8.02%)	505.53 (1.40%)	9866.52 (27.26%)	344.97 (0.95%)
承德市	48.96 (0.13%)	721.26 (1.85%)	940.32 (2.41%)	12.42 (0.03%)	419.4 (1.08%)	1815.39 (4.66%)	252.81 (0.65%)	12237.66 (31.42%)	407.52 (1.05%)
沧州市	6.21 (0.04%)	0 (0.00%)	519.39 (3.73%)	2.79 (0.02%)	0 (0.00%)	10.8 (0.08%)	441.36 (3.17%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)
廊坊市	23.22 (0.36%)	0.09 (0.00%)	486.81 (7.60%)	7.56 (0.12%)	0.09 (0.00%)	38.79 (0.61%)	217.26 (3.39%)	6.57 (0.10%)	1.26 (0.02%)
衡水市	0.27 (0.00%)	0 (0.00%)	323.46 (3.67%)	0.09 (0.00%)	0 (0.00%)	5.04 (0.06%)	379.17 (4.30%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)

1、2、3、4、5、6、7、8 分别指代耕地、林地、草地、水域、城镇用地、农村居民点、其他建设用地和未利用地

在生态保护情景下,所有市的 CES 平均值都上升,其中承德市上升幅度最大,这是因为其新增林地面积最多。北京市 CES 大幅上升等级面积占比最多,是因为其农村居民点转变为林地的面积占比最高。承德和张家口新增林地面积及占比均位居前两名,远超其他各市,其 CES 上升总面积占比也远超其他各市,表明其生态系统服务总体水平有很大幅度的提升。生态保护情景下产水量有较大幅度的减少,是由于树木的强烈蒸

散作用导致,这与前人的研究结果相一致^[51]。京津冀部分地区存在水资源紧缺和地下水超载的问题^[52],因此不可盲目扩大造林面积,需因地制宜确定合适的生态保护措施。

耕地保护情景下,北京市、承德市和张口市在耕地保护情景下 CES 严重下降、中度下降地区和总的下降面积占比分别位列第一,这是因为其林地被城镇用地和农村居民点侵占、草地被城镇用地侵占、林地和草地被耕地侵占的面积及比例均分别位列第一。仅衡水、沧州、廊坊和天津市的 CES 平均值有轻微上升,是因为其农村居民点复垦为耕地的面积较多,其中衡水、沧州和廊坊的转移比例位居前三,而天津市农村居民点复垦为耕地的面积多于其林地转变为城镇用地和农村居民点、草地转变为城镇用地以及毁林、毁草造田这几种地类变化加起来的总面积。京津冀除秦皇岛、张家口和承德外的其他城市均分布在黄淮海平原,城市周边大都是耕地,因此耕地极易被城镇用地和农村居民点侵占。在过去 20 年,中国 70% 的耕地增量来自对农村居民点的整治^[53],因此可通过加强对农村居民点的整治复垦来增加耕地面积。此外, Li 等^[54] 研究发现,改善剩余耕地质量比保持数量平衡更重要。可采取提高已有耕地单位面积产量、发展城市垂直农业和铺设河岸植被缓冲带等措施提高粮食产量,减少水污染和水土流失。

4.2 不足与展望

本文仍然存在一些不足,土地利用变化会影响多种生态系统服务,由于数据限制本研究只选取了 5 种生态系统服务,在以后的研究中拟结合区域实际情况,研究京津冀地区的粮食生产、空气净化和文化服务等其他生态系统服务,更加全面综合地评估土地利用变化对多种生态系统服务的影响。

5 结论

(1) FLUS 模型的 FoM 系数为 0.138,说明 FLUS 模型适用于研究区的土地利用模拟。模拟结果表明,在自然发展情景下,城镇用地和农村居民点不断侵占周围的耕地、林地和草地。在耕地保护情景下,耕地增加 12381.57 km² (12.04%),得到了有效保护。在生态保护情景下,林地面积增加了 30633.75 km² (68.30%),得到了有效保护。

(2) 生态保护情景下,京津冀区域的生境质量、碳储量、土壤保持量 and 水质净化能力得到最大的提升,在西部和北部山区的提升最为明显,但产水量却有较大幅度的下降。在自然发展情景下,一定数量的耕地、林地和草地转化为城镇用地和农村居民点,促进了产水、土壤保持和水质净化能力的提高,但却引发了最严重的碳储量和生境质量损失,损失地区主要分布在各市中心城区周围。耕地保护情景下,主要是水质净化能力大幅度下降,生境质量和土壤保持量也有小幅下降。

(3) 不同情景下综合生态系统服务指数 CES 的空间分布格局相似,城镇用地、农村居民点和其他建设用地的 CES 值较低,林地和草地的 CES 值较高。自然发展情景下, CES 下降区域面积最多, CES 严重下降主要发生在林地被城镇用地侵占的地区,其次是被农村居民点侵占的地区;耕地被城镇用地和农村居民点侵占导致 CES 的轻度下降,面积占比最大。北京市、张家口市和邯郸市在自然发展情景下 CES 严重下降、中度下降和总下降地区面积占比分别位列第一,在未来需加强对这三个市的土地利用宏观调控。

耕地保护情景下, CES 轻度下降区域面积最多,主要是水质净化能力的下降。生态保护情景下,京津冀 CES 上升区域最多, CES 平均值最高,表明退耕还林等生态修复工程可以促进生态系统服务的总体水平大幅提高,生态保护情景是最有利于可持续发展的土地利用方案,但需注意大量造林可能带来的水资源短缺,要因地制宜保护生态环境。

参考文献 (References):

- [1] Rao Y X, Zhou M, Ou G L, Dai D Y, Zhang L, Zhang Z, Nie X, Yang C. Integrating ecosystem services value for sustainable land-use management in semi-arid region. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 662-672.
- [2] Wang C D, Wang Y T, Wang R Q, Zheng P M. Modeling and evaluating land-use/land-cover change for urban planning and sustainability: a case study of Dongying city, China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 1529-1534.

- [3] Sun X, Lu Z M, Li F, Crittenden J C. Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs to support the supply of multiple ecosystem services in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 117-129.
- [4] Song W, Deng X Z. Effects of urbanization-induced cultivated land loss on ecosystem services in the North China plain. *Energies*, 2015, 8(6): 5678-5693.
- [5] Haas J, Ban Y F. Urban growth and environmental impacts in Jing-Jin-Ji, the Yangtze, River Delta and the Pearl River Delta. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 30: 42-55.
- [6] 李换换, 宋伟, 陈百明, 张艳. 农村居民点时空格局演化模拟研究综述. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(1): 79-88.
- [7] 刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 韩立建, 钱雨果. 京津冀城市群扩张模式对区域生态安全的影响预测. *生态学报*, 2018, 38(5): 1650-1660.
- [8] 姜广辉, 张凤荣, 谭雪晶, 霍荟阁, 赵婷婷. 北京市平谷区农村居民点用地生态服务功能分析. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 210-216.
- [9] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 黄秀兰, 卢志强. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3457-3466.
- [10] 邓越, 蒋卫国, 王文杰, 吕金霞, 陈坤. 城市扩张导致京津冀区域生境质量下降. *生态学报*, 2018, 38(12): 4516-4525.
- [11] 盛晓雯, 曹银贵, 周伟, 成陆, 张辉. 京津冀地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(6): 79-86.
- [12] Wang S, Li W J, Li Q, Wang J F. Ecological security pattern construction in Beijing-Tianjin-Hebei region based on hotspots of multiple ecosystem services. *Sustainability*, 2022, 14(2): 699.
- [13] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [14] Liang X, Liu X P, Li X, Chen Y M, Tian H, Yao Y. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 177: 47-63.
- [15] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios*. Washington: Island Press, 2005.
- [16] Costanza R, De Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [17] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, Jones L, Ziv G, Clarke D, Oliver T H, Bullock J M. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Science of the Total Environment*, 2016, 569-570: 1418-1426.
- [18] 汪翡翠, 汪东川, 张利辉, 刘金雅, 胡炳旭, 孙志超, 陈俊合. 京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析. *生态学报*, 2018, 38(12): 4307-4316.
- [19] 李进涛, 刘彦随, 杨园园, 刘继来. 1985-2015 年京津冀地区城市建设用地时空演变特征及驱动因素研究. *地理研究*, 2018, 37(1): 37-52.
- [20] 胡乔利, 齐永青, 胡引翠, 张玉翠, 吴成本, 张广录, 沈彦俊. 京津冀地区土地利用/覆被与景观格局变化及驱动力分析. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1182-1189.
- [21] 王旭, 马博文, 李丹, 陈昆仑, 姚华松. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 230-242.
- [22] Hu Y F, Gao M, Batunacun. Evaluations of water yield and soil erosion in the Shaanxi-Gansu Loess Plateau under different land use and climate change scenarios. *Environmental Development*, 2020, 34: 100488.
- [23] Yang Y Y, Bao W K, Liu Y S. Scenario simulation of land system change in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Land Use Policy*, 2020, 96: 104677.
- [24] 曾辉, 高凌云, 夏洁. 基于修正的转移概率方法进行城市景观动态研究——以南昌市区为例. *生态学报*, 2003, 23(11): 2201-2209.
- [25] 赵琳琳, 夏乐天. 灰色马尔可夫链模型的改进及其应用. *河海大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(4): 487-490.
- [26] 陆汝成, 黄贤金, 左天惠, 肖思思, 赵小凤, 张兴榆. 基于 CLUE-S 和 Markov 复合模型的土地利用情景模拟研究——以江苏省环太湖地区为例. *地理科学*, 2009, 29(4): 577-581.
- [27] 高星, 杨刘婉青, 李晨曦, 宋昭颖, 王杰. 模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应. *生态学报*, 2021, 41(20): 7974-7988.
- [28] 冀咏赞, 闫慧敏, 刘纪远, 匡文慧, 胡云锋. 基于 MODIS 数据的中国耕地高中低产田空间分布格局. *地理学报*, 2015, 70(5): 766-778.
- [29] Li H H, Song W. Pattern of spatial evolution of rural settlements in the Jizhou District of China during 1962-2030. *Applied Geography*, 2020, 122: 102247.
- [30] 李换换. 新型城镇化背景下农村居民点空间格局演化研究及模拟预测——以天津市蓟州区为例[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [31] Zheng F Y, Hu Y C. Assessing temporal-spatial land use simulation effects with CLUE-S and Markov-CA models in Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(32): 32231-32245.
- [32] Gong J Z, Hu Z R, Chen W L, Liu Y S, Wang J Y. Urban expansion dynamics and modes in metropolitan Guangzhou, China. *Land Use Policy*, 2018, 72: 100-109.
- [33] Batisani N, Yarnal B. Urban expansion in Centre county, Pennsylvania; spatial dynamics and landscape transformations. *Applied Geography*,

- 2009, 29(2): 235-249.
- [34] Jin G, Chen K, Wang P, Guo B S, Dong Y, Yang J. Trade-offs in land-use competition and sustainable land development in the North China Plain. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 141: 36-46.
- [35] Sharp R, Douglass J, Wolny S, Arkema K, Bernhardt J, Bierbower W, Chaumont N, Denu D, Fisher D, Glowinski K, Griffin R, Guannel G, Guerry A, Johnson J, Hamel P, Kennedy C, Kim C K, Lacayo M, Lonsdorf E, Mandle L, Rogers L, Silver J, Toft J, Verutes G, Vogl A L, Wood S, Wyatt K. InVEST 3.11.0.post88+ug.ghbddd6 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2020 [2022-08-25]. <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html>.
- [36] 许丁雪, 吴芳, 何立环, 刘海江, 江源. 土地利用变化对生态系统服务的影响——以张家口-承德地区为例. *生态学报*, 2019, 39(20): 7493-7501.
- [37] 廖珍梅, 杨薇, 蔡宴朋, 王炬, 熊文抒. 大清河-白洋淀流域生态功能评价及分区初探. *环境科学学报*, 2022, 42(1): 131-140.
- [38] Chen T Q, Feng Z, Zhao H F, Wu K N. Identification of ecosystem service bundles and driving factors in Beijing and its surrounding areas. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134687.
- [39] Wang C, Zhan J Y, Chu X, Liu W, Zhang F. Variation in ecosystem services with rapid urbanization: A study of carbon sequestration in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2019, 110: 195-202.
- [40] 吴瑞, 刘桂环, 文一惠. 基于 InVEST 模型的官厅水库流域产水和水质净化服务时空变化. *环境科学研究*, 2017, 30(3): 406-414.
- [41] Wen Y H, Liu G H, Wu R. Eco-Compensation in Guanting reservoir watershed based on spatiotemporal variations of water yield and purification services. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(4): 416-425.
- [42] Lateral P, Orúe M E, Booman G C. Spatial complexity and ecosystem services in rural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 154: 56-67.
- [43] Pan Y, Xu Z R, Wu J X. Spatial differences of the supply of multiple ecosystem services and the environmental and land use factors affecting them. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 4-10.
- [44] Wu J X, Zhao Y, Yu C Q, Luo L M, Pan Y. Land management influences trade-offs and the total supply of ecosystem services in alpine grassland in Tibet, China. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193: 70-78.
- [45] Chen D S, Zhao Q Q, Jiang P H, Li M C. Incorporating ecosystem services to assess progress towards sustainable development goals: a case study of the Yangtze River economic Belt, China. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 151277.
- [46] 张蓬涛, 刘双嘉, 周智, 刘春敬, 徐磊, 高星. 京津冀地区生态系统服务供需测度及时空演变. *生态学报*, 2021, 41(9): 3354-3367.
- [47] 白杨, 郑华, 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控. *生态学报*, 2013, 33(3): 711-717.
- [48] 申嘉澍, 梁泽, 刘来保, 李德龙, 张亚彤, 李双成. 雄安新区生态系统服务簇权衡与协同. *地理研究*, 2020, 39(1): 79-91.
- [49] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, Nalley L L. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 165: 6-18.
- [50] 马海涛, 卢硕, 张文忠. 京津冀城市群城镇化与创新的耦合过程与机理. *地理研究*, 2020, 39(2): 303-318.
- [51] Fu Q, Li B, Hou Y, X B, Zhang X S. Effects of land use and climate change on ecosystem services in Central Asia's arid regions: A case study in Altay Prefecture, China. *Science of The Total Environment*, 2017, 607-608: 633-646.
- [52] 于潇, 吕春艳, 郭旭东, 张智杰, 李双成, 郝继坤. 京津冀城市群地区土地生态状况评估. *中国土地科学*, 2018, 32(4): 89-96.
- [53] Zhou Y, Li X H, Liu Y S. Cultivated land protection and rational use in China. *Land Use Policy*, 2021, 106: 105454.
- [54] Li X, Chen Y M. Projecting the future impacts of China's cropland balance policy on ecosystem services under the shared socioeconomic pathways. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250: 119489.