

DOI:10.13332/j.1000-1522.20180244

河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响

刘晓¹ 张学霞¹ 徐新良² 陈德超³

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要:【目的】定量研究土地利用背景下生态系统服务价值的时空变化特征, 旨在正确认识不同生态系统服务功能对土地利用变化的响应机制, 为坝上区域土地利用格局优化与生态经济协调发展提供参考。【方法】本文以河北坝上张北、沽源、丰宁3县为研究对象, 采用GIS空间分析方法, 分析了2000年以来土地利用时空动态变化特征, 并在此基础上利用陆地生态系统服务价值估算模型评估了生态系统服务价值及其对土地利用变化的响应, 进而探讨了该地区生态与经济发展的协调性。【结果】(1)2000—2015年坝上地区湿地、草地面积逐渐减少, 分别减少28、26 km², 建筑用地面积持续增加, 共增加24 km², 其他土地利用面积稍有增加; 草地和湿地主要向农田转移, 建筑用地的增加主要来自于农田、湿地的转移。(2)坝上地区生态系统服务价值总体上呈“西低东高”的趋势, 低值区主要位于张北西部, 而高值区主要位于丰宁南部燕山森林区; 15年间, 坡上地区85.92%的区域生态系统服务价值呈增加态势, 生态系统服务总价值共增加334.83亿元, 其中, 气候调节服务价值增加最多, 增加了90.44亿元, 土壤保持、水文调节、水资源供给价值先增后减; 草地、森林和湿地对生态系统服务总价值的贡献率在85%以上, 对生态系统服务的影响最大。(3)坝上地区人均生态系统服务价值逐渐增加, 生态经济协调度为0.09, 处于潜在危机区, 坡上地区的生态经济系统具有潜在的危险性。【结论】坝上地区生态系统服务价值逐渐提高, 但对坝上生态系统服务功能起重要贡献作用的草地和湿地退化明显, 经济发展仍受生态压力的制约, 生态环境仍然脆弱。

关键词: 土地利用; 生态系统服务价值; 坡上地区; 生态经济协调度指数

中图分类号: S718.55⁺⁷ 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2019)08-0094-11

引文格式: 刘晓, 张学霞, 徐新良, 等. 河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(8):94-104. Liu Xiao, Zhang Xuexia, Xu Xinliang, et al. Impacts of land use change on ecosystem service value in Bashang Area of Hebei Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(8): 94-104.

Impacts of land use change on ecosystem service value in Bashang Area of Hebei Province, northern China

Liu Xiao¹ Zhang Xuexia¹ Xu Xinliang² Chen Dechao³

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Beijing 100101, China;

3. Key Laboratory of Environmental Science and Engineering of Jiangsu Province, School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China)

Abstract: 【Objective】 By quantitatively studying the temporal and spatial variation characteristics of ecosystem service value under the background of land use, this paper aims to correctly understand the

收稿日期: 2018-07-26 修回日期: 2018-11-12

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0500802), 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20010302)。

第一作者: 刘晓。主要研究方向: 3S技术集成开发与应用。Email: jxc_xiao@yeah.net 地址: 100083北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 徐新良, 博士, 研究员。主要研究方向: 土地利用/土地覆被变化与陆地生态系统综合监测与评估。Email: xuxl@lreis.ac.cn 地址: 100101北京市朝阳区安外大屯路甲11号。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

response mechanism of different ecosystem service functions to land use change, and provide a scientific basis for the optimization of land use pattern and coordinated development of ecological economy in the Bashang Area, Hebei Province of northern China. [Method] Taking Zhangbei, Guyuan and Fengning counties as research objects, this paper uses mathematical model to analyze the temporal and spatial dynamics of land use since 2000. Based on this, the ecosystem service value was evaluated by the estimation method of land ecosystem service value, and its response to land use change was analyzed. Then the coordination of ecological and economic development in the Bashang Area was explored. [Result] The results showed that: (1) during the study period, the built-up land in the Bashang Area increased by 24 km², while wetland and grassland reduced by 28 and 26 km², respectively. The reduced grasslands and wetlands were mainly converted into farmland, and the increase in built-up land mainly comes from farmland and wetlands. (2) Land use change led to the change of ecological environment in the research area and influenced the ecosystem service value. The ecosystem service value in the Bashang Area is generally high in the west and low in the east. The low value area is mainly located in the western part of Zhangbei, and the high value area is located in the Yanshan forest in the south of Fengning. In the past 15 years, the ecosystem services value in 85.92% of the Bashang Area had been increased, with a total increase of 33.483 billion RMB. Among them, the value of climate regulation services increased the most, increasing by 9.044 billion RMB, while soil conservation, hydrological regulation and water supply value both rose first and then decreased; the ecosystem service value was mainly provided by the grassland, forestland, and wetland, and their contribution rate was over 85%, which had the greatest impact on the value of ecosystem services in the Bashang Area. (3) Although the per capita ecosystem service value has gradually increased in the Bashang area, the eco-economic coordination degree was 0.09. This shows that the ecological economic system in the Bashang area is potentially dangerous. [Conclusions] The ecosystem service value in the Bashang Area has gradually increased, but the grassland and wetland playing an important role in the ecological service function have been degraded. The economic development is still constrained by ecological pressure, and the ecological environment is still fragile.

Key words: land use; ecosystem service value; Bashang; eco-economic harmony index (EEH)

目前生态系统服务价值评估是地理学、生态经济学等相关学科研究的热点问题之一,它在生态屏障建设规划、生态保护红线划分和生态经济协调中发挥着重要作用^[1-2]。而土地利用变化过程对生态系统服务功能起着决定性作用,影响着区域生态环境的质量^[3-4]。因此,在土地利用背景下对区域生态系统服务价值进行定量研究,有助于正确认识区域生态环境的动态变化趋势,对推动区域生态建设和经济发展具有重要意义^[5]。

生态系统服务是指人类通过生态系统获得的所有惠益,包括直接或间接得到的生命支持产品和服务^[6]。1997年Costanza等基于效用价值理论和均衡价值理论,制定了全球生态系统服务价值当量因子表,为后来的研究奠定了理论和方法基础^[6]。国内学者欧阳志云等^[7]评估了中国陆地生态系统的服务功能,并对生态系统服务功能与可持续发展研究的关系进行了探讨。谢高地在Costanza的研究基础上,依据国情,通过生物量参数对当量因子表进行多次

修订,并制定了2007年^[8]及2015年^[9]的中国生态系统服务价值当量因子表。同时,有些学者还利用植被覆盖指数(NDVI)、气候因子和社会经济发展因子等来修正生态系统服务的价值^[10]。目前参考Costanza和谢高地等人研究成果,采用当量因子法进行评估的方法应用最为广泛。如柴仲平等^[11]对石河子市生态系统、孙慧兰等^[12]对伊犁河草地生态系统、彭建刚等^[13]对奇台绿洲荒漠交错带生态系统的服务价值评估等均采用中国生态系统服务价值当量因子表。国内对土地利用变化的研究主要集中在时空格局、驱动因素、演变趋势、对生态环境的影响等方面,第二次全国土地调查工作的完成以来,土地利用变化对区域生态环境的影响成为研究热点^[14],如苏海霞等^[4]、武爱彬等^[15]运用不同土地利用动态变化和某服务价值量变化或价值量贡献率的多少研究了土地利用变化对生态系统服务价值的影响。而研究区依然以“热点地区”和“脆弱区”为主,中小尺度上的研究还相对薄弱^[14],并且现有的研究大多也只是

从土地利用类型与价值量变化的多少的角度去分析,而对土地利用如何影响生态系统服务价值的空间变化和结构变化的研究较少,且进一步探讨区域生态与经济发展的关系的研究不足。

近年来,由于人口的快速增长和土地的过度开发,坝上地区土地利用类型变化迅速、土地荒漠化、草地退化和水域缩小等环境问题十分严重。坝上的生态退化已严重影响了首都经济圈的生态安全及区域可持续发展^[4]。在保证生态安全的基础上,如何实现经济和环境之间协调可持续发展成为坝上地区的重要生态问题。基于此,本文以坝上地区张北、沽源、丰宁三县为研究区,在分析2000年以来土地利用变化时空特征的基础上,基于谢高地等^[9]提出的生态系统服务价值评估模型,研究了土地利用变化对生态系统服务价值的影响,并探讨了生态环境与地区经济发展之间的协调性,以期为坝上地区土地利用格局优化调整、土地资源合理开发利用、生态经济协调可持续发展提供一定的理论支撑和科学依据。

1 研究区概况

坝上地区位于河北张家口、承德两市的北部,包括康保、沽源、张北的全部和尚义、丰宁、围场的一部分,是京津地区重要的生态屏障、城市供水源地、风沙源重点治理区。该区处于半干旱与半湿润过渡气

候带,农牧交错,生态环境脆弱,自然灾害频繁,土地利用粗放,人地矛盾突出,生态安全问题突出,是坝上高原沙化严重区域^[16-17]。该区平均海拔1250~1600 m,年平均气温1.4~5.0℃,年平均风速4.5~5.0 m/s,年大风日数65~70 d,无霜期80~110 d,年平均降水量400 mm左右,且冬春季干旱,大部分降水集中在夏季的6—9月,占全年降水量的81.6%^[18]。坝上地貌包括波状高原、疏缓丘陵、坝缘山地,张北、沽源、丰宁3县基本包含了这3种类型,具有典型的代表性。

坝上张北、沽源、丰宁3县总面积16 235 km²,农田是坝上最主要的土地利用类型,面积为6 849 km²,占研究区总面积的41.43%;其次是森林和草地,分别占总面积的27.73%、24.70%;湿地面积小于农田、森林和草地,排第4,为606 km²,占比为3.66%;建筑用地面积为253 km²,占比为1.53%;水域和荒漠面积较小,各占研究区面积的0.88%、0.07%(图1)。本区域作为潮河和滦河的发源地,是京津地区重要的水源供给地,处于京津城市边缘地区,但皆为国家级贫困县,经济发展形势严峻。鉴于该区域在区位条件、生态环境、经济发展等方面的特殊性,选取该3县作为研究区探讨土地利用变化对生态系统服务的影响,以及区域生态经济的协调性,具有区域典型性和重要实践价值。

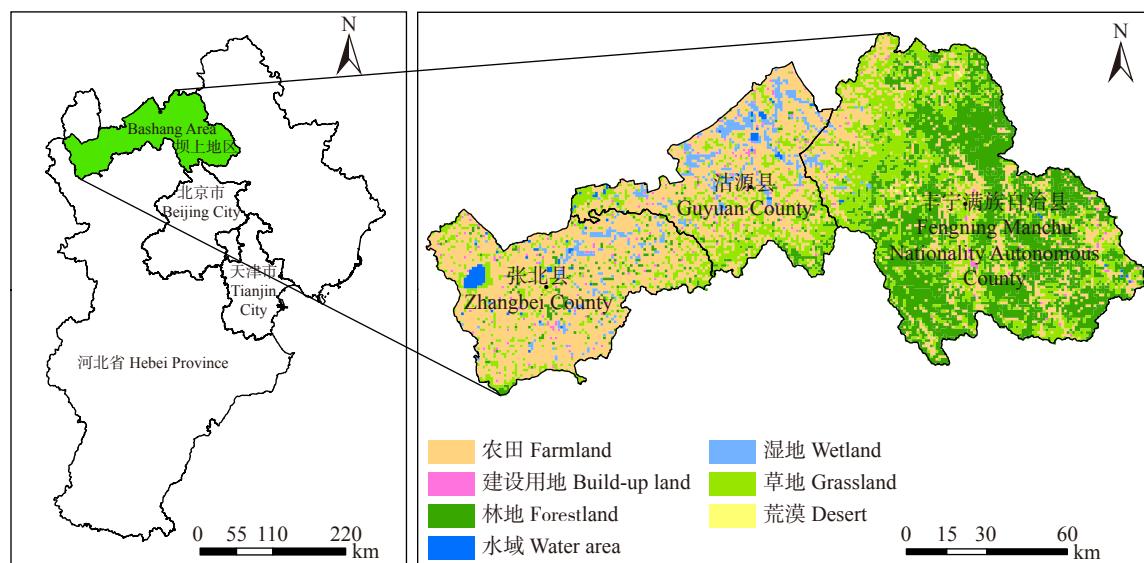


图1 研究区位示意图(2015年)

Fig. 1 Location map of study area (2015)

2 材料与方法

2.1 数据来源

本文用到的数据包括多时期土地利用数据、植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)数

据、降水数据、土壤保持量数据等。土地利用数据包括2000、2005、2010和2015年4期,来源于中国科学院资源环境科学数据中心的1:10万比例尺土地利用现状多时期遥感监测数据集^[19-21]。该数据集以Landsat TM/ETM遥感影像为主要数据源,通过人工

目视解译生成, 经过野外调查实地验证, 土地利用一级类型监测精度达到93%以上^[22-24]。文中将土地利用类型划分为七类, 其中湿地是指沼泽地, 水域指河渠、湖泊、水库坑塘、滩地、冰川积雪等, 而荒漠包括高寒荒漠、苔原、裸岩石质地、沙地、戈壁等。本文用到的NPP数据、降水数据、土壤保持量均来自中国科学院资源环境科学数据中心^[25], 空间分辨率均为1 km。其中NPP数据是基于光能利用率模型GLO-PREM计算获取的; 年降水量空间插值数据是基于气象站点日观测数据, 运用澳大利亚的ANUSPLIN插值软件, 通过整理、计算和空间插值处理生成; 土壤保持量数据^[26-27]的计算是运用通用土壤流失方程(USLE)计算全国潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量, 二者相减即为土壤保持量。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用类型变化特征

本研究采用土地利用变化比例(K), 通过计算土地利用变化面积和比例, 定量分析土地利用类型变化特征^[28]。计算公式^[28-29]如下:

$$K = \frac{U_{t_2} - U_{t_1}}{U_{t_1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: U_{t_1} , U_{t_2} 为研究区 t_1 和 t_2 时期某一土地利用类型的面积。

2.2.2 生态系统服务价值估算

本文参考谢高地等^[8,30]制定的中国生态系统服务价值评估方法, 取单位面积农田生态系统粮食生产的净利润作为1个标准当量因子的生态系统服务价值量, 农田生态系统的粮食产量价值主要依据稻谷、小麦、玉米三大粮食产物计算^[9]。单位面积粮食的经济价值在不同时期会发生变化, 随着科学技术的进步会逐渐增加, 而且, 这个价值也受通货膨胀的影响^[31]。这里统一取全国2010年单位面积农田生态系统的粮食产量价值作为1个标准当量因子的生态系统服务价值量^[9]。

研究中借鉴谢高地2015年修订的我国生态系统服务功能价值基础当量数据^[9], 采用2000—2015年坝上地区的净初级生产力、降水量、土壤保持量数据计算其调整系数, 对生态系统服务价值基础当量进行空间动态调整, 从而评估了坝上地区生态系统服务价值。2000和2015年关于生态系统服务价值基础当量的净初级生产力、降水量、土壤保持量调整系数如下图2、3、4所示。可见2000—2015年间坝上地区大部分地区NPP和降水量调整系数呈明显增加态势; 丰宁南部土壤保持量调整系数明显增加, 而张北西部地区有所降低。

区域生态系统服务价值总量(E)计算公式为:

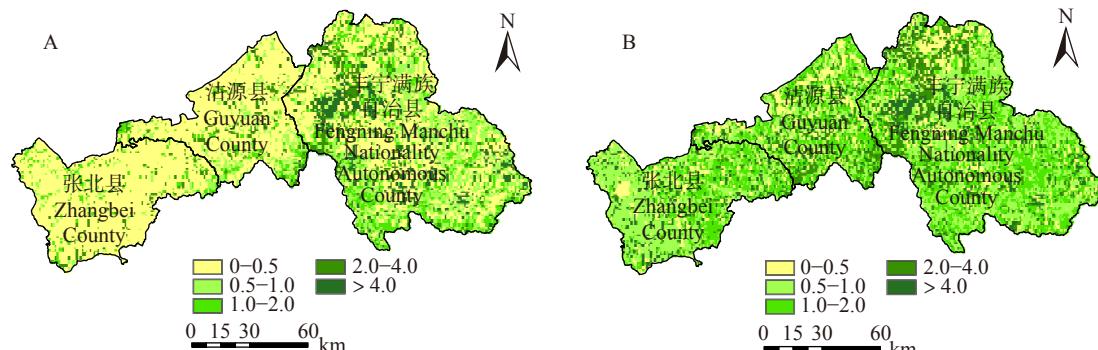


图2 2000年(A)和2015年(B)生态系统服务价值基础当量净初级生产力调整系数

Fig. 2 NPP adjustment coefficient of ecosystem service value (ESV) in 2000 (A) and 2015 (B)

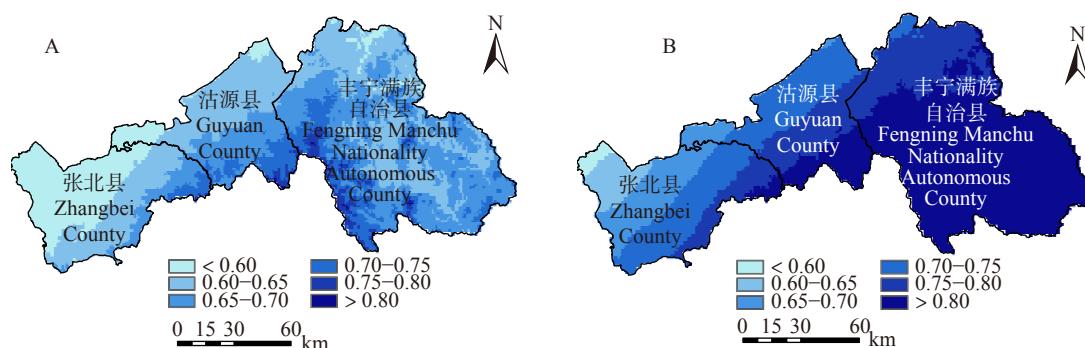


图3 2000年(A)和2015年(B)生态系统服务价值基础当量降水量调整系数

Fig. 3 Precipitation adjustment coefficient of ESV in 2000 (A) and 2015 (B)

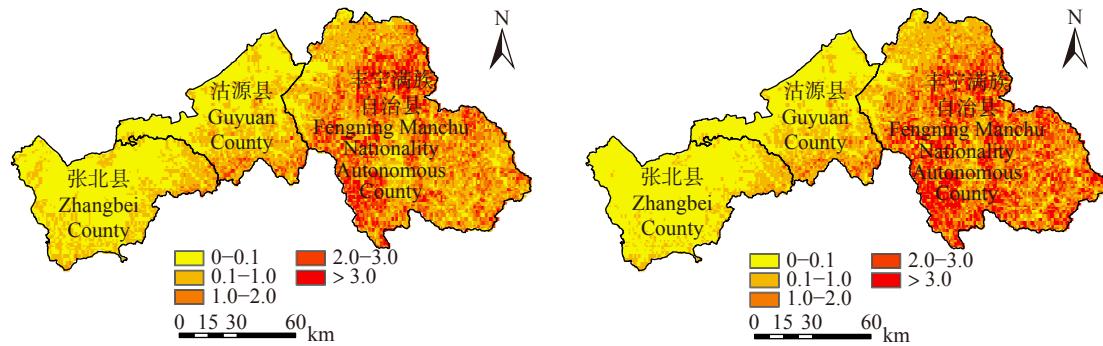


图 4 2000 年(A)和 2015 年(B)生态系统服务价值基础当量土壤保持量调整系数

Fig. 4 Soil conservation adjustment coefficient of ESV in 2000 (A) and 2015 (B)

$$E = \sum_{c=1}^n E_c \quad (2)$$

式中: $c = 1, 2, \dots, n$, 表示生态系统服务功能的类型; E_c 表示生态系统第 c 种生态系统服务价值。建筑用地参考 Costanza 等专家的思路, 其生态系统服务功能价值不参与计算^[6]。

$$E_c = \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^m D \times F_{cij} \times A_{lj} \quad (3)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, m$, 表示第 c 种生态系统服务功能的第 j 类生态系统; F_{cij} 指第 j 类生态系统在第 i 地区第 c 种生态系统服务功能的单位面积价值当量因子; D 表示 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量(元/ hm^2), 这里取 D 值为 2010 年^[9]全国标准当量 3 406.5 元/ hm^2 ; $l = 1, 2, \dots, n$, 表示一定区域内第 j 类生态系统在空间上分布的象元数; A_{lj} 表示各个象元的面积大小, 对于等面积投影, A_{lj} 为给定的常数。

使用以下公式评估研究区的生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)变化^[31]:

$$C = \frac{E_{\text{end}} - E_{\text{start}}}{E_{\text{start}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: C 是 ESV 的变化比例, E_{start} 是研究期开始时的 ESV, E_{end} 是研究期结束时的 ESV。

2.2.3 生态经济协调度

本文构建了生态经济协调度指数(eco-economic harmony index, EEH)来探讨坝上地区生态环境与经济发展之间的协调性, 以期为坝上地区人与自然和谐相处、生态经济协调发展提供理论支撑。生态-经济协调度(EEH)是指研究期内人均生态系统服务价值的变化率(S_r)与人均 GDP 生产总值 Q 变化率(Q_r)^[32-33]之比:

$$\text{EEH} = \frac{S_r}{Q_r} \quad (5)$$

$$S_r = \frac{S_j - S_i}{S_i} \quad (6)$$

$$Q_r = \frac{Q_j - Q_i}{Q_i} \quad (7)$$

式中: EEH 为生态-经济协调度, S_i, S_j 分别为研究区某时期始、末年份的人均生态系统服务功能价值(元/人), Q_i, Q_j 为研究区某时期始、末年份人均 GDP 生产总值(元/人)。EEH ≥ 1 表明研究期内区域生态系统服务价值增长速度高于经济增长速度。此时区域可能存在两种极端发展状态^[17]:一是区域生态经济高度协调, 二是区域不得不对早期受到破坏的生态环境进行恢复, 而后者的经济发展明显受制于生态环境; $0 < \text{EEH} < 1$ 表示研究期内区域生态系统服务价值增长速度要低于经济增长速度, 生态系统服务价值在增加, 区域经济发展对生态环境恶化存在潜在的危机; $-1 \leq \text{EEH} < 0$ 表示研究期内区域生态系统服务价值增长为负, 区域经济发展与生态环境保护相冲突, 区域生态经济发展不协调。EEH < -1 表示研究区该时段生态系统服务价值发生显著下降, 生态环境恶化, 区域经济发展与生态环境保护严重冲突, 生态经济发展不协调, 该区域呈不可持续发展。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征分析

2000—2015 年坝上 3 县土地利用类型发生了不同程度的变化, 主要表现在湿地、草地减少, 建筑用地、农田、森林、水域增加(表 1、图 5)。其中, 建筑用地变化比例为 10.48%, 变化幅度最大, 15 年来面积一直呈增加趋势, 共增加了 24 km^2 , 城镇化发展迅速, 尤其是 2010—2015 年间显著增加, 增加比例为 6.75%; 其次, 湿地面积减少最多, 变化比例为 -4.42% , 且 15 年间一直呈减少趋势, 共减少 28 km^2 ; 同样面积一直持续减少的还有草地, 共减少 26 km^2 , 该区域草地和湿地退化形势严峻; 农田和森林面积略有增加, 分别增加 15、14 km^2 , 面积变化比例较小; 水域面积较小, 15 年来总面积变化小, 对该区域土地利用总体格局影响不大; 而荒漠面积没有变化。

通过 ArcGIS 叠加得出 2000—2015 年坝上土地

表 1 2000—2015 年河北坝上土地利用类型面积变化

Tab. 1 Changes of land use type in Bashang Area from 2000 to 2015

类型 Type	2000—2005		2005—2010		2010—2015		2000—2015	
	面积变化 Variation of area /km ²	变化比例 Variance ratio/%	面积变化 Variation of area/km ²	变化比例 Variance ratio/%	面积变化 Variation of area/km ²	变化比例 Variance ratio/%	面积变化 Variation of area/km ²	变化比例 Variance ratio/%
建筑用地 Build-up land	5	1.31	3	1.28	16	6.75	24	10.48
农田 Farmland	6	0.09	18	0.26	-9	-0.13	15	0.22
林地 Forestland	14	0.31	0	0.00	0	0.00	14	0.31
水域 Water area	-11	-7.64	12	9.02	0	0.00	1	0.69
荒漠 Desert	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
草地 Grassland	-13	-0.32	-12	-0.29	-1	-0.02	-26	-0.63
湿地 Wetland	-1	-0.16	-21	-3.32	-6	-0.98	-28	-4.42

注: 此处的湿地是指沼泽地, 水域包括河渠、湖泊、水库坑塘、滩地和冰川积雪。下同。Notes: the wetland here refers to the marshland, and the water area includes river canals, lakes, reservoir pits, beaches and glacial snow. Same as below.

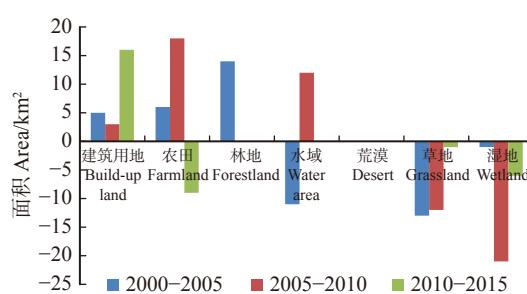


图 5 2000—2015 年河北坝上土地利用类型面积变化

Fig. 5 Changes of land use type in Bashang Area from 2000 to 2015

利用类型转移矩阵表。从表 2 中可以看出, 2000—2015 年, 坝上土地利用类型发生了不同程度的转变, 主要表现为农田向森林和建筑用地的转化, 草地向农田的转化, 湿地向农田和建筑用地的转化。其中农田主要转向森林、建筑用地, 转化面积均为 16 km², 人口的大量增加及快速城镇化使得人们对居住空间

的需求的加大, 是农田转向建筑用地的主要原因, 农田转向森林则是由于坝上退耕还林等政策的实施; 湿地和草地的减少, 主要是因为转化成了农田, 转化面积分别 25、22 km², 主要原因是农业活动的需要以及对农田的补偿; 水域还转化为草地, 转化面积为 4 km², 这是由于该区气候干旱加上资源不合理的利用, 导致水域的干涸, 生长为耐盐碱的草地; 其他地类之间的转化非常小, 本文不予分析。

3.2 生态系统服务价值变化分析

2015 年坝上 3 县生态系统服务的总价值量为 835.98×10^8 元。就生态系统而言, 草地和森林的服务价值量最高, 分别为 313.22×10^8 元、 284.09×10^8 元, 各占总价值的 37.47%、33.98%; 其次是湿地 (15.43%)、农田 (7.61%)、水域 (5.48%), 荒漠所占比重偏低 (表 3)。2000—2015 年间, 生态系统服务价值总体呈上升趋势, 具体表现为“前期增长较缓慢,

表 2 2000—2015 年坝上土地利用类型转移矩阵

Tab. 2 Land use type transfer matrix in Bashang Area from 2000 to 2015

年份 Year	类型 Type	2015						
		农田 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	湿地 Wetland	建筑用地 Build-up land	荒漠 Desert	水域 Water area
2000	农田 Farmland	6 800	16	0	2	16	0	0
	林地 Forestland	2	4 568	0	0	1	0	0
	草地 Grassland	22	1	4 079	0	0	0	3
	湿地 Wetland	25	0	0	604	3	0	2
	建筑用地 Build-up land	0	0	0	0	229	0	0
	荒漠 Desert	0	0	0	0	0	12	0
2015	水域 Water area	0	0	4	0	0	0	140

后期增长较快”,15年间生态系统服务价值增加334.83亿元,增长比例为70.21%。其中,草地和森林的增量较大,高达107.79亿元和105.06亿元,分别占总增量的31.26%、30.47%,远远高于其他土地利用类型;其次是湿地和农田生态系统,生态系统服务价值分别增加83.12亿元、34.68亿元,变化比例分

别为181.26%、119.72%;水域和荒漠生态系统服务价值共计增加14.19亿元,但荒漠增幅最高,达851.15%,主要原因是坝上地区2000—2015年荒漠生态系统的NPP明显增加,2015年的坝上荒漠生态系统NPP远超全国荒漠生态系统的平均NPP,NPP调整系数突增,极大地提高了其生态服务功能。

表3 2000—2015年河北坝上生态系统服务价值及其变化

Tab. 3 Value of ecosystem services and its changes in Bashang Area during 2000—2015

类型 Type	2000 2000 ESV/ 10^8 元 RMB	2005 2005 ESV/ 10^8 元 RMB	2010 2010 ESV/ 10^8 元 RMB	2015 2015 ESV/ 10^8 元 RMB	2000—2015年变化量/ 10^8 元 Variation of ESV in 2000—2015/ 10^8 RMB	2000—2015年变化比例 Variance ratio in 2000—2015/%
	农田 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	湿地 Wetland	荒漠 Desert	水域 Water area
农田 Farmland	28.97	34.51	37.81	63.64	34.67	119.72
林地 Forestland	179.03	244.26	236.27	284.09	105.06	58.68
草地 Grassland	205.43	211.13	247.24	313.22	107.79	52.47
湿地 Wetland	45.85	43.19	52.96	128.97	83.12	181.26
荒漠 Desert	0.02	0.04	0.03	0.21	0.19	853.15
水域 Water area	31.84	27.72	39.72	45.85	14.01	43.98
合计Total	491.14	560.85	614.03	835.98	344.84	70.21

就生态系统服务类别重要性而言,2015年河北坝上3县调节和支持服务功能的价值量最高,其中气候调节和水文调节服务的价值量分别为 205.26×10^8 元和 137.83×10^8 元,分别占总价值的24.55%和16.49%。其次是生物多样性、土壤保持、气体调节和净化环境,约占总服务价值的43.14%;其他各项生态系统服务价值较低,仅占总服务价值的15.82%(表4)。2000—2015年坝上整体生态环境质量逐渐得到改善,除土壤保持、水资源供给、水文调节服务价值在2010—2015年间稍有减少外,其余各服务价

值均呈逐年增加态势(图6)。其中,气候调节服务价值增加90.44亿元,增加最多,占总增量的26.23%;美学景观、食物生产、生物多样性、净化环境等服务价值变化比例较大,增加幅度均在50%以上,说明15年来坝上生态明显改善、生物多样化、环境更加优美;土壤保持服务价值变化比例逐渐下降,2010—2015年呈减小趋势,说明坝上3县土壤保持能力先逐渐平缓提升后降低,可能与草地和湿地的减少有关。

河北坝上3县的生态系统服务价值空间分布如图7所示。根据2015年生态系统服务价值的分级呈

表4 2000—2015年坝上不同服务功能的价值统计

Tab. 4 Value statistics of different ecosystem services in the Bashang Area during 2000—2015

生态系统服务 Ecosystem service	生态系统服务价值/ 10^8 元 Ecosystem service value/ 10^8 RMB				生态系统服务价值变化比例 Variance ratio in ecosystem service value/%			
	2000	2005	2010	2015	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2000—2015
食物生产 Food production	12.88	14.56	15.51	29.62	13.00	6.50	91.04	56.52
原料生产 Raw material production	14.40	16.64	17.57	28.69	15.60	5.57	63.26	49.79
水资源供给 Water resource supply	9.77	9.95	11.92	11.81	1.83	19.83	-0.94	17.27
气体调节 Gas regulation	44.80	51.40	55.16	86.52	14.70	7.31	56.85	48.22
气候调节 Climate regulation	114.82	130.88	139.68	205.26	14.00	6.72	46.95	44.06
净化环境 Purification environment	37.50	42.31	45.53	77.06	12.80	7.62	69.25	51.33
水文调节 Hydrological regulation	114.61	117.84	140.42	137.83	2.83	19.16	-1.85	16.85
土壤保持 Soil conservation	66.80	92.60	96.98	89.37	38.60	4.72	-7.84	25.26
维持养分循环 Maintain nutrient cycling	4.74	5.34	5.73	9.32	12.60	7.44	62.50	49.12
生物多样性 Biodiversity	48.70	54.64	58.88	107.62	12.20	7.75	82.80	54.75
美学景观 Aesthetic landscape	22.12	24.66	26.65	52.87	11.50	8.06	98.38	58.16
合计 Total	491.14	560.84	614.04	835.98	14.20	9.49	36.14	41.25

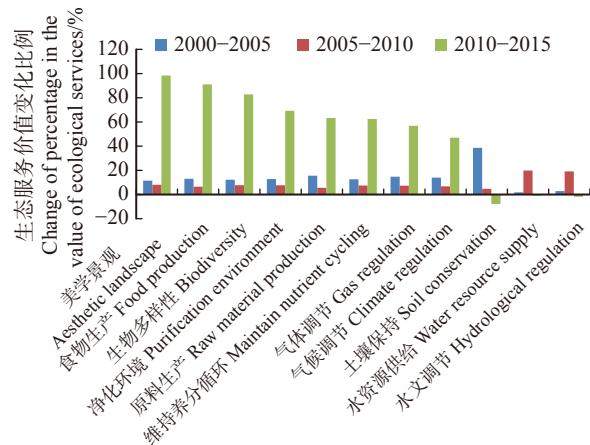


图 6 2000—2015 年坝上地区各类生态系统服务的价值变化

Fig. 6 Changes in value of various types of ecosystem services in Bashang Area from 2000 to 2015

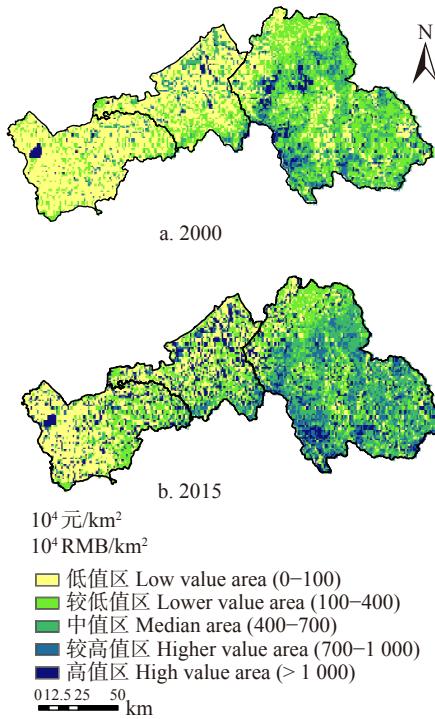


图 7 2000—2015 年河北坝上生态系统服务价值空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of ecosystem service value of Bashang Area from 2000 to 2015

现, 从整体来看, 2015 年坝上生态系统服务价值中高值区的面积为 7823 km^2 , 占生态功能区总面积的 47.32% (表 5)。其中, 高值区 ($\text{ESV} > 1000 \text{ 万元}/\text{km}^2$) 面积为 2312 km^2 , 占研究区总面积的 13.98%; 而低值区即生态系统服务价值小于 $100 \text{ 万元}/\text{km}^2$ 的面积为 4326 km^2 , 占研究区总面积的 26.17%。生态系统服务价值总体上呈“西低东高”的趋势, 低值区主要位于张北及沽源县农田分布区域, 而高值区主要分布于丰宁县南部的森林和草地分布区域, 这主要是因为坝上地区从西北向东南降水量分布逐渐递增、土地利用类型逐渐由农田向草地和森林过渡, 丰宁南部森林区 NPP 和土壤保持量较高, 生态系统服务能力较好。

2000—2015 年坝上 3 县 85.92% 的区域生态系统服务价值呈增加态势, 其中张北县生态系统服务价值提升明显, 而生态系统服务价值降低区域主要集中在丰宁西部。这主要是由于 15 年间丰宁西部区域降水量和 NPP 稍有减少, 且部分草地和湿地转为农田造成的。从生态系统服务等级来看, 生态系统服务价值等级由低值区向中高值区转换, 中高值区 ($\text{ESV} > 400 \text{ 万元}/\text{km}^2$) 的面积共增加 3354 km^2 , 占总面积的 20.28% (图 8)。其中高值区、较高值区的面积分别增加 1626 km^2 、 1035 km^2 , 分别占研究区总面积的 9.84%、6.26%; 而低值区面积减少了 2549 km^2 , 占研究区总面积的 15.42%。

3.3 生态经济协调度

2000—2015 年人均生态服务价值和人均 GDP 均呈增加趋势, 说明坝上地区经济发展的同时, 其生态环境也在改善, 人均生态压力在减小。15 年间经济协调度范围均在 0~1 之间, 表明研究区的人均生态系统服务价值增长速度小于人均 GDP 的增长速度, 区域经济发展受到生态环境的压力。为了更好地地区分研究区 15 年来生态经济环境的演变, 根据 EEH 值的大小可以细分为以下几类^[17,34]: $0.8 < \text{EEH} < 1$ 为高协调区, 生态经济系统向着相互

表 5 2000—2015 年生态系统服务价值分级统计

Tab. 5 Grading statistics of ecosystem service value for Bashang Area during 2000—2015

生态系统服务价值/ $(10^4 \text{ 元} \cdot \text{km}^{-2})$ Ecosystem service value/ $(10^4 \text{ RMB} \cdot \text{km}^{-2})$	2000		2015		2000—2015	
	面积 Area/ km^2	比例 Percentage/%	面积 Area/ km^2	比例 Percentage/%	面积 Area/ km^2	比例 Percentage/%
低值区 Low value area (0—100)	6 875	41.59	4 326	26.17	- 2 549	- 15.42
较低值区 Lower value area (100—400)	5 188	31.38	4 383	26.51	- 805	- 4.87
中值区 Median area (400—700)	2 794	16.90	3 487	21.09	693	4.19
较高值区 Higher value area (700—1 000)	989	5.98	2 024	12.24	1 035	6.26
高值区 High value area (> 1 000)	686	4.15	2 312	13.98	1 626	9.84

注: 比例均为占研究区总面积的比例。Note: the percentage all means the percentage in the total study area.

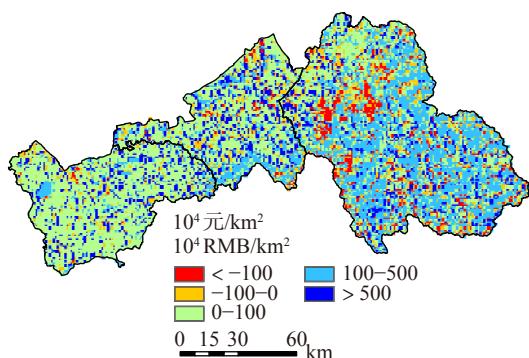


图 8 2000—2015 年河北坝上生态系统服务价值变化图

Fig. 8 Spatial variation of ecosystem service value in the Bashang Area from 2000 to 2015

影响、彼此促进的和谐状态发展; $0.6 < \text{EEH} < 0.8$ 为较高度协调区, 生态经济系统发展状况好, 二者协调度较高; $0.4 < \text{EEH} < 0.6$ 为中度协调区, 生态经济系统发展状况较好, 二者同步协调发展; $0.2 < \text{EEH} < 0.4$ 为较低度协调区, 生态经济系统发展状况改善, 二者相互促进; $0 < \text{EEH} < 0.2$ 为潜在危机区, 生态经济系统存在潜在危险, 如果不注重生态系统的治理, 将影响区域经济的发展。

2000—2015 年间, 坝上 3 县人均 GDP 增长率为 722.92%, 而人均生态系统服务价值增长率为 66.39%, 经济协调度为 0.09, 处于潜在危机区(表 6)。其中, 2000—2005 年, 经济协调度为 0.13, 处于潜在危机区; 2005—2010 年生态系统服务价值增速降低, 经济协调度下降为 0.07, 说明生态环境与经济发展趋于更不协调状态, 处于冲突的边缘; 2010—2015 年生态系统服务价值增速大幅提升, 经济协调度为 0.42, 接近于中度协调的下限, 生态经济系统发展状况仍不容乐观, 需要引起重视。

表 6 2000—2015 年坝上生态经济协调度变化

Tab. 6 Changes in EEH in Bashang Area from 2000 to 2015

年份 Year	S_r	Q_r	EEH
2000—2005	15.44%	119.49%	0.13
2005—2010	7.37%	106.29%	0.07
2010—2015	34.24%	81.75%	0.42
2000—2015	66.39%	722.92%	0.09

注: GDP、人口数据来源于 2001、2006、2011、2016 年河北经济年鉴。
Note: the GDP and population data come from the Hebei Province Economic Yearbook in 2001, 2006, 2011, 2016.

4 结论与讨论

对生态系统服务价值的评估能够较好地反映出生态系统环境变化状况, 通过找出导致变化的因素, 能够为当地政府制定合适的可持续发展政策提供科学依据。本文基于土地利用数据参考谢高地等提出

的生态系统服务价值估算方法, 对河北坝上张北、沽源、丰宁 3 县土地利用类型及生态系统服务价值的变化进行深入分析, 主要结论如下:

(1) 农田是坝上最主要的土地利用类型, 占研究区总面积的 41.43%; 其次是森林和草地, 分别占总面积的 27.73%、24.70%。2000—2015 年坝上 3 县土地利用类型变化主要表现为建筑用地、森林、农田、水域增加, 湿地、草地减少。转化的主要类型为: 农田向森林和建筑用地的转化, 草地、湿地向农田和建筑用地的转化。其中, 建筑用地面积增加最多, 增加 24 km², 湿地的面积减少最多, 减少 28 km², 变化比例分别为 10.48%、-4.42%。

(2) 2000—2015 年间, 坝上生态系统服务总价值逐年增加, 具体表现为“前期增加较缓慢, 后期增加较快”, 15 年间生态系统服务价值增加 334.83 亿元, 变化比例为 70.21%。本研究结论与苏海霞和武爱彬等^[28-29]研究中坝上生态系统服务总价值在增加, 湿地和草地面积在减少等结论相符, 说明本研究结论可信。15 年间, 坝上地区有 3.9% 的湿地转为农田, 是张北和沽源北部地区生态系统服务价值的降低的主要原因, 也一定程度上导致了土壤保持、水文调节、水资源供给服务价值增量逐渐减小至有所降低。湿地提供的最为重要的生态系统服务功能就是水文调节、水资源供给, 而作为北京和天津最重要的水源涵养地, 坝上地区的湿地生态状况直接决定了京津地区的用水安全和生态平衡。应采取合理生态恢复措施, 以改善不同退化程度的湿地生态系统服务功能, 实施严格的湿地保护政策, 加强对湿地的保护。

(3) 2000—2015 年坝上 3 县 85.92% 的区域生态系统服务价值呈增加态势, 但丰宁西北部生态系统服务价值有降低趋势。生态系统服务价值总体上呈“西低东高”的分布格局, 低值区主要位于张北及沽源县地区的农田分布区域, 高值区为燕山山地森林分布区, 张北西部地区主要是农田分布区, 生态系统服务价值较低, 且气候干旱, 水位逐年下降, 引起张北县的安固里淖等水域的干涸及土地的盐碱化, 应适当根据气候条件适当调整其农耕方式, 以达到保护生态环境的目的。

(4) 2000—2015 年间坝上三县生态经济协调度为 0.09, 经济发展速度是生态系统服务价值增长速度的 10.89 倍, 尽管生态系统服务价值逐年增加, 但生态经济发展总体上已处于潜在危机区, 接近不协调。为了实现坝上地区生态系统服务功能可持续利用, 必须对该地区的人类活动进行合理的规范和科学管理。因此, 坝上地区经济发展应坚持以生态优

先为原则, 削减生态环境压力, 推动坝上绿色可持续发展, 实现生态环境保护和区域经济发展的双赢。

本文基于土地利用数据对坝上地区生态系统服务价值的时空变化进行了分析, 并结合区域经济对生态经济发展的协调度进行探讨, 得出坝上草地、湿地退化形势严峻, 生态系统服务总价值提高显著, 但2010年来土壤保持、水文调节、水资源供给服务价值略有降低, 生态经济发展处于不协调的边缘等结论。由于生态系统本身的复杂性、异质性和动态性, 以及对价值当量不同的修正方法, 会使生态系统服务价值的计算结果有一定的偏差, 但作为该区域宏观参考值, 揭示坝上生态系统服务演变规律及生态经济发展状况毋庸置疑具有重要的意义, 也为进一步分析气候干旱、人口压力、工程措施的实施等自然条件和人类活动驱动因素提供研究基础。在坝上生态环境脆弱、土地利用类型不断变化背景下, 预测未来不同土地利用情境下生态系统服务价值的变化趋势, 将为决策者提供更可靠的参考依据, 这将是今后进一步的研究方向之一。

参 考 文 献

- [1] 赵海凤. 四川省森林生态系统服务价值计量与分析 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Zhao H F. The value of forest ecosystem services accounting and analysis in Sichuan, China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [2] 王兵. 生态连清理论在森林生态系统服务功能评估中的实践 [J]. 中国水土保持学报, 2016, 14(1): 1–11.
Wang B. Practice of theory of ecological continuous inventory system in the evaluation of forest ecosystem services function[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(1): 1–11.
- [3] 高渐飞, 熊康宁. 喀斯特石漠化生态系统服务价值对生态治理的响应: 以贵州花江峡谷石漠化治理示范区为例 [J]. 中国农业生态学报, 2015, 23(6): 775–784.
Gao J F, Xiong K N. Ecosystem service value responses to ecological control in Karst region: a case study of Huajiang Gorge Demonstration Area of Rocky Desertification Control in Guizhou[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(6): 775–784.
- [4] 苏海霞, 马礼, 郭万翠. 坝上沽源县土地利用变化对生态系统服务价值的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2008(4): 196–200.
Su H X, Ma L, Guo W C. Effects of land use change on values of ecosystem services of Guyuan County[J]. Agriculture Research in the Arid Areas, 2008(4): 196–200.
- [5] 丁彬, 李学明, 孙学晖, 等. 经济发展模式对乡村生态系统服务价值保育和利用影响: 以鲁中山区三个村庄为例 [J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3033–3052.
Ding B, Li X M, Sun X H, et al. Impact of economic development model on ecosystem service value: A case study of three mountain villages in Middle Shandong, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): 3033–3052.
- [6] Costanza R, d'Arge R, de Groot R S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253–260.
- [7] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价 [J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635–640.
Ouyang Z Y, Wang R S, Zhao J Z. Ecosystem services and their economic valuation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(5): 635–640.
- [8] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法 [J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911–919.
Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem service in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911–919.
- [9] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243–1254.
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243–1254.
- [10] 陈彧, 李江风, 徐佳. 基于GWR的湖北省社会经济因素对生态服务价值的影响 [J]. 中国土地科学, 2015, 29(6): 89–96.
Chen Y, Li J F, Xu J. The impact of socio-economic factors on ecological service value in Hubei Province: a geographically weighted regression approach[J]. China Land Science, 2015, 29(6): 89–96.
- [11] 柴仲平, 王雪梅, 蒋平安. 石河子市土地利用变化及其对绿洲生态系统服务功能影响分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(10): 19–24.
Chai Z P, Wang X M, Jiang P A. Impact of land use type change on ecosystem service function in Shihezi oasis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(10): 19–24.
- [12] 孙慧兰, 陈亚宁, 李卫全, 等. 新疆伊犁河流域草地类型特征及其生态服务价值研究 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1273–1277.
Sun H L, Chen Y N, Li W Q, et al. Study on types and ecological service values of grassland in the Ili River Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(5): 1273–1277.
- [13] 彭建刚, 周月明, 安文明, 等. 奇台绿洲荒漠交错带生态系统服务功能价值评估研究 [J]. 新疆农业科学, 2010, 47(8): 1665–1670.
Peng J G, Zhou Y M, An W M, et al. Assessment on Functional Value of Ecosystem Service in Oasis and Desert Criss—cross Zone in Qitai Region[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(8): 1665–1670.
- [14] 毛欢. 区域土地利用/覆盖变化及其生态系统服务价值响应研究: 以四川省江油市为例 [D]. 成都: 四川师范大学, 2015.
Mao H. Research on regional land use/cover change and its ecosystem service value response: a case study of Jiangyou City in Sichuan Province[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2015.
- [15] 武爱彬, 赵艳霞. 坝上高原生态用地时空格局演变与生态系统服务价值分析 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 283–290.

- Wu A B, Zhao Y X. Analysis of ecological land pattern evolution and ecosystem service value in Bashang Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 283–290.
- [16] 孙丕苓, 许月卿, 刘庆果, 等. 环京津贫困带土地利用多功能性的县域尺度时空分异及影响因素 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 283–292.
- Sun P L, Xu Y Q, Liu Q G, et al. Spatiotemporal differentiation and driving factors of multi-functionality of land use in county scale in poverty belt around Beijing and Tianjin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 283–292.
- [17] 孙丕苓. 生态安全视角下的环京津贫困带土地利用冲突时空演变研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- Sun P L. Temporal and spatial evolution of land use conflict in the poverty belt around Beijing-Tianjin from the perspective of ecological security[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [18] 孙洪艳. 河北省坝上土地荒漠化机制及生态环境评价 [D]. 北京: 中国地质大学, 2005.
- Sun H Y. Study on Mechanism of Desertification and Evaluation of Ecologic Environment in Bashang, Hebei Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2005.
- [19] 刘纪远, 张增祥, 庄大方, 等. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析 [J]. 地理研究, 2003, 22(1): 1–12.
- Liu J Y, Zhang Z X, Zhuang D F, et al. A study on the spatial-temporal dynamic changes of land-use and driving forces analyses of China in the 1990s[J]. Geographical Research, 2003, 22(1): 1–12.
- [20] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995–2000[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2003, 46(4): 373–384.
- [21] Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(4): 483–494.
- [22] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatio-temporal characteristics, patterns and causes of landuse changes in China since the late 1980s[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2): 195–210.
- [23] Liu W C, Liu J Y, Kuang W H, et al. Examining the influence of the implementation of Major Function-oriented Zones on built-up area expansion in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(6): 643–660.
- [24] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010–2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征 [J]. 地理学报, 2018, 73(5): 789–802.
- Liu J Y, Ning J, Kuang W H, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010–2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 789–802.
- [25] 中国科学院资源环境科学数据中心. <http://www.resdc.cn/>.
- Chinese Academy of Sciences Resource and Environmental Science Data Center. <http://www.resdc.cn/>.
- [26] 肖玉, 谢高地, 安凯. 青藏高原生态系统土壤保持功能及其价值 [J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2367–2378.
- Xiao Y, Xie G D, An K. The function and economic value of soil conservation of ecosystems in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11): 2367–2378.
- [27] 张静, 曹生奎, 曹广超, 等. 青海湖流域土壤保持量动态变化 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 326–331, 350.
- Zhang J, Cao S K, Cao G C, et al. Variation of soil conservation quantity in Qinghai Lake Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(2): 326–331, 350.
- [28] 熊伟英, 师学义. 黄土山丘区土地利用变化对生态系统服务价值的影响: 以长河流域为例 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 335–340, 389.
- Xiong L Y, Shi X Y. Effects of Land Use Change on ecosystem service value in the loess hilly area: a case study of the Changhe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 335–340, 389.
- [29] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应 [J]. 地理学报, 2014, 69(1): 54–63.
- Wu L N, Yang S T, Liu X Y, et al. Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River basin since 1976[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 54–63.
- [30] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资源的价值评估 [J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189–196.
- Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189–196.
- [31] Song W, Deng X Z. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 576: 705–719.
- [32] 成六三. 生态保护区生态服务价值对土地利用的响应—以重庆市武隆区为例 [J]. 人民长江, 2018, 49(2): 15–18, 55.
- Cheng L S. Responses of ecological services value to land use in ecological protection area: case of Wulong County, Chongqing[J]. Yangtze River, 2018, 49(2): 15–18, 55.
- [33] 孙慧兰, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 新疆伊犁河流域生态服务价值对土地利用变化的响应 [J]. 生态学报, 2010, 30(4): 887–894.
- Sun H L, Li W H, Chen Y P, et al. Response of ecosystem service value to land use changes in the Ili River Basin, Xinjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4): 887–894.
- [34] 魏晓旭, 赵军, 魏伟, 等. 基于县域单元的中国生态经济系统协调度及空间演化 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1535–1545.
- Wei X X, Zhao J, Wei W, et al. Coordinated development of ecological-economic system and spatial evolution based on county unit in China[J]. Progress in Geography, 2014, 33(11): 1535–1545.

(责任编辑 范娟
责任编辑 余新晓)