

哈长城市群生态系统服务时空特征及其 权衡/协同关系研究

于媛^{1,2}, 韩玲¹, 李明玉¹, 相恒星², 王宗明^{2,3}, 张世栋^{1,2}, 杨桃⁴

(1.延边大学 地理与海洋科学学院, 吉林 延吉 133002;

2.中国科学院 东北地理与农业生态研究所 湿地生态与环境重点实验室,

长春 130102; 3.国家地球系统科学数据中心, 北京 100101; 4.空军航空大学, 长春 130000)

摘 要:哈长城市群位列国家二级城市群之首,研究哈长城市群地区的生态系统服务变化及权衡协同关系对促进该区域可持续发展具有深远意义。基于多源遥感数据结合 InVEST 模型及权衡协同度模型(ESTD),分析了哈长城市群 2000 年、2010 年、2015 年土地覆被变化;评估了土壤保持、生态系统碳储量及产水量 3 种生态系统服务的时空分布及其权衡协同关系。结果表明:(1) 2000—2015 年,哈长城市群内建设用地的共增加 1 462 km²,其中,2000—2010 年增长量(958 km²)高于 2010—2015 年(504 km²),15 年间林地共增加 1 527 km²,草地、耕地及裸地分别减少 661 km², 1 611 km², 780 km²;(2) 15 年间土壤保持量持续降低,生态系统碳储量先减后增,产水量先增后减;(3) 6 种土地覆被类型中,单位面积下林地提供的土壤保持力最高,湿地提供的生态系统碳储量和产水量最高;(4) 协同作用在哈长城市群 3 种生态系统服务间占主导地位;南部的土壤保持—生态系统碳储量及土壤保持—产水量多为协同关系,北部相反,从全区来看生态系统碳储量—产水量间的相关关系相对较弱。研究结果可为哈长城市群地区制定更为全面具体的生态保护策略提供参考依据。

关键词:哈长城市群;生态系统服务;权衡协同度;区域异质性

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0293-08

Study on the Spatial-Temporal Characteristics of Ecosystem Services and Tradeoffs/Synergies in Ha-Chang Urban Agglomeration

YU Yuan^{1,2}, HAN Ling¹, LI Mingyu¹, XIANG Hengxing²,

WANG Zongming^{2,3}, ZHANG Shidong^{1,2}, YANG Guang⁴

(1.College of Geography and Marine Science, Yanbian University, Yanji, Jilin 133002, China;

2.Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and

Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 3.National Earth System

Science Data Center of China, Beijing 100101, China; 4.Aviation University Air Force, Changchun 130000, China)

Abstract: Ha-Chang urban agglomeration ranks first in the national second-tier city group. Studying the changes of ecosystem services and weighing the synergy between the Ha-Chang urban agglomeration areas is of far-reaching significance to promote the sustainable development of the region. Based on multi-source remote sensing data combined with InVEST model and trade-off synergy model (ESTD), we analyzed the land cover changes in 2000, 2010 and 2015 of Ha-Chang urban agglomeration, the spatial-temporal distribution of three ecosystem services, soil conservation, carbon storage and water production, and their tradeoff synergy relationship. The results show that: (1) from 2000 to 2015, the total construction land in the Ha-Chang urban agglomeration increased by 1 462 km²; among them, the growth rate from 2000 to 2010 (958 km²) was higher than that from 2010 to 2015 (504 km²); in the past 15 years, the forest land increased by 1 527 km²,

收稿日期:2020-05-11

修回日期:2020-05-28

资助项目:国家自然科学基金“延龙图地区城市生态用地评价与空间格局优化研究(41461036);2019 年吉林省“十三五”科学技术项目(JJKH20191124KJ);吉林省科技发展计划项目(20200301014RQ)

第一作者:于媛(1997—),女,吉林白城人,硕士研究生,研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail:1466770259@qq.com

通信作者:韩玲(1988—),女,江苏南京人,讲师,在读博士,研究方向:城市地理、城市规划。E-mail:260985592@qq.com

and the grassland, cultivated land and bare land decreased by 661 km², 1 611 km² and 780 km², respectively; (2) in the past 15 years, the amount of soil conservation continued to decrease, the carbon storage decreased first and then increased, and the water yield increased first and then decreased; (3) among the six types of land cover, the forest land provided the highest soil conservation capacity per unit area, and the wetland provided the highest carbon storage and water yield; (4) synergism was dominant among the three ecosystem services of Ha-Chang urban agglomeration; the soil conservation-carbon storage and soil conservation-water production in the south were mostly synergistic, on the contrary in the North, from the whole area, the correlation between carbon storage-water production was relatively weak. The results can provide the reference for the development of more comprehensive and specific ecological protection strategies in the Ha-Chang urban agglomeration area.

Keywords: Ha-Chang urban agglomeration; ecosystem services; tradeoffs synergies degree; regional differences

生态系统服务是指生态系统所形成和维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用^[1],也泛指人类直接或间接从生态系统所得到的各种收益^[2]。不同的生态系统服务在变化过程中存在着复杂的相互关系,主要表现为消彼长的权衡关系和彼此增益的协同关系^[3-4]。其中权衡指的是某些土地覆被类型生态系统服务的供给,因其他类型的过度使用使其逐渐减少的情形^[5-6];协同指的是两种及两种以上的生态系统服务在发展的过程中同时增强的情景^[7-8]。当今社会,由于缺乏对生态系统服务重要性的认知,长期的环境破坏导致生态系统服务的日渐退化,同时也威胁着人类的安全与健康^[9]。因此,认清生态系统服务间的变化特征,对实现区域经济稳定发展及生态环境保护的“共赢”有着深远意义^[10-11]。

伴随千年生态系统服务评定^[12]的展开,有关生态系统服务权衡协同关系的研究达到了一个新的高潮^[13-15]。Kragt 等^[16]引用 APSIM 模型,解析澳大利亚全国的农产品供给与生态系统服务间的权衡关系,进一步将研究成果应用到农业生产中;Richards 等^[17]运用帕累托曲线分析了热带沿海地区的生境质量与各生态指标间的权衡协同关系。饶胜等^[18]应用极值法探讨草原生态系统中畜牧产品与防风固沙间的权衡关系,从中得到了适用于该地区的最优生物量分配方案;葛菁等^[19]研究了多种不同土地覆被情景下雅砻江二滩水利枢纽区降低面源污染、水库泥沙淤积等生态系统服务间的响应机理。尽管关于生态系统服务的权衡协同研究愈加受到学者们的广泛关注,并发表了大量研究成果,但关于其内部复杂性及区域异质性研究还很薄弱。

哈长城市群作为二级城市群之首,是我国北方重要的林、粮、牧的产出基地,也是我国首要的生态功能保护区,具有人类过度干扰、土地开发程度高、生态环境脆弱和社会经济发展相对落后等特征。目前为止,还未有专家学者针对哈长城市群的生态系统服务权

衡协同关系展开研究,因此,本研究基于遥感、土壤、气象、数字高程模型(DEM)等多源数据,以哈长城市群为例,基于 InVEST 模型定量测算研究区 2000 年、2010 年、2015 年土壤保持、生态系统碳储量以及产水量 3 种关键生态系统服务,采用相关系数法,探究研究区 3 种生态系统服务间的权衡协同关系,通过建立生态系统服务权衡协同度模型(ESTD)用以表征相互作用程度和方向,并引入堆积柱状图对比不同土地覆被类型的生态系统服务变化特征,以期为后续研究提供一定的参照作用,并为实现区域可持续发展与生态保护的“双赢”提供参考建议。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

哈长城市群处于东北地区腹地,位于 122°24′—131°18′E,42°00′—48°55′N。横跨黑龙江、吉林二省,包括 10 个地级市,1 个自治州,面积约 32.22 万 km²,2015 年末全区总人口约 4 768 万人,GDP 生产总值约 24 836 亿元(2015 年)。气候为温带季风气候,气温年较差较大,植被类型以温带落叶阔叶林为主。主要地形有山地和平原,东西高程差异较大。山地主要分布在东南地区,以长白山为主,土地覆被类型主要为林地、草地;平原主要分布在中西部,以松嫩平原为主,土地覆被类型以耕地、人工表面为主。哈长城市群作为新兴城市群,其快速的城镇化进程及高强度的耕地扩张对哈长城市群的土地覆被类型改变强度增大,使原本脆弱的生态环境变得更加脆弱,区域内部的生态服务功能明显下降,已严重威胁到了哈长城市群一体化的可持续发展。

1.2 数据来源

本研究以 Landsat TM/OLI 影像(<http://glovis.usgs.gov>)为基准提取哈长城市群 2000 年、2010 年、2015 年 3 期土地覆被数据。辅助数据涵盖:(1) 30 m 分辨

率的 DEM,源于国际科学数据服务平台;(2) 气温降水数据,源于中国气象科学数据共享服务网提供的“中国地面气候资料月值数据集”,获取研究区各气象站点历年的平均气温及年降水量等数据。(3) 土壤数据源于国家地球系统科学数据中心的吉林省和黑龙江省土壤数据集;(4) 碳密度数据参考李慧颖等^[20]的研究。

2 研究方法

2.1 分类方法及精度评价

根据哈长城市群土地覆被的分布特征,参考 Wang 等^[21]的分类方法,形成适用于哈长城市群的分类体系。共分为建设用地、林地、草地、耕地、湿地、裸地 6 个一级类。应用 eCognition 软件进行面向对象的多尺度分割;基于数字高程模型(DEM)和大量的野外验证点,以监督分类、决策树分类、目视解译 3 种方法相结合开展不同土地覆被信息的提取,以获取研究区不同时期土地覆被的空间分布数据^[22]。经过大量野外验证点和高空间分辨率遥感影像的反复验证,3 期土地覆被的分类精度均高于 90.5%,满足本研究需求。

2.2 生态系统服务定量评估方法

2.2.1 土壤保持量估算 InVEST 模型中的泥沙输移模块(SDR)是以像元尺度的通用土壤流失方程(USLE)方法^[23]为基础,以栅格为基础单元估算土壤流失量,用以表示哈长城市群的泥沙流失量。其计算公式为:

$$\begin{aligned} SD &= RKLS - ULSE \\ RKLS &= R \times K \times LS \\ ULSE &= R \times K \times LS \times C \times P \end{aligned}$$

式中:SD 为土壤保持量;RKLS 为潜在土壤侵蚀量;ULSE 为实际土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀因子^[24]; K 为土壤可蚀性因子^[25];LS 为坡长坡度因子^[26]; C 为植被覆盖与作物管理因子^[27]; P 为水土保持措施因子^[28]。该评价方法已成功应用于辽宁省^[20],并取得了良好的评估结果。

2.2.2 生态系统碳储量估算 陆地生态系统中的碳存储,一般分为以下 4 种基本碳库:地上部分碳、地下部分碳、死亡有机碳及土壤碳^[29]。以各土地覆被类型作为评估单元,应用 InVEST 模型中的生态系统碳储量模块将 4 种基本碳库的平均碳密度乘上各评估单元面积来估算哈长城市群的生态系统碳储量,计算公式如下^[29]:

$$C_i = C_{i(\text{above})} + C_{i(\text{below})} + C_{i(\text{dead})} + C_{i(\text{soil})}$$

式中: i 为某一种生态系统类型; C_i 为第 i 种生态系统类型的碳密度(t/hm^2); $C_{i(\text{above})}$, $C_{i(\text{below})}$, $C_{i(\text{dead})}$, $C_{i(\text{soil})}$ 分别

为第 i 种类型的地上部分生态系统碳储量,地下部分生态系统碳储量,死亡有机生态系统碳储量和土壤生态系统碳储量(t/hm^2)^[30]。该评价方法已成功应用于嫩江流域^[30],并取得了良好的评估结果。

2.2.3 产水量估算 InVEST 模型中的产水模块是水量均衡原理为基准,同时关注气候、植被、土壤等影响因素,以栅格为基础单元来评定研究区不同景观类型的产水能力。计算公式如下^[26,31]:

$$Y_i = (1 - \frac{AET_i}{P_i}) \times P_i$$

式中: AET_i 为栅格单 i 的实际蒸散量; P_i 为栅格单元 i 的年降水量^[32]。

$$\frac{AET_i}{P_i} = 1 + \frac{PET_i}{P_i} - [1 + (\frac{PET_i}{P_i})^{w_i}]^{1/w_i}$$

$$w_i = Z \times \frac{AWC_i}{P_i} + 1.25$$

$$PET_i = K_i \times ET_i$$

式中: PET_i 为年潜在蒸散量; w_i 为自然气候表示土壤性质的非物理参数^[33]; AWC_i 为植被可利用的体积含水量(mm); Z 为 Zhang 系数^[34](无量纲),本研究取值 3.2; K_i 为植被的蒸散系数^[35]; ET_i 为第 i 个栅格单元的潜在蒸散量。

$ET_i = 0.0013 \times 0.408 \times TA \times (TC + 17) \times (TD - 0.0123P)^{0.76}$
式中:TA 为大气顶层辐射($\text{MJ}/\text{mm}/\text{d}$);TC 为日均最高与最低温度的平均值($^{\circ}\text{C}$);TD 为日均最高与最低温度的差值($^{\circ}\text{C}$); P 为月均降水量(mm)。

$$\begin{aligned} AWC_i &= \min(\max\text{soildepth}, \text{rootdepth}) \times PA \\ PA &= 54.509 - 0.132\text{sand} - 0.003(\text{sand})^2 - \\ &\quad 0.055(\text{silt})^2 - 0.738\text{clay} + 0.007(\text{clay})^2 - \\ &\quad 2.688\text{MN} + 0.501(\text{MN})^2 \end{aligned}$$

式中: $\max\text{soil depth}$ 为土壤最大深度; root depth 为植被根系深度; PA 为植被可利用水; sand 为砂粒的百分比含量; silt 为粉粒的百分比含量; clay 为黏粒的百分比含量; MN 为有机质的百分比含量。该评价方法已成功应用于长白山地区^[36],并取得了良好的评估结果。

2.3 生态系统服务权衡与协同度指数(ESTD)

为了更好地评估研究区内 3 种生态系统服务的权衡协同关系,在参考李鸿健等^[37]的研究基础上,本研究引用了生态系统服务权衡协同度(ESTD)模型进行相关评估。用以表示研究区内各生态系统服务间的相互作用和变化机理,公式如下:

$$ESTD_{mn} = \frac{ES_{mb} - ES_{ma}}{ES_{nb} - ES_{na}}$$

式中: $ESTD_{mn}$ 为第 m, n 种生态系统服务权衡协同

度; ES_{mb} 为 b 时段第 m 种生态系统服务的变化量; ES_{ma} 为 a 时段第 m 种生态系统服务的变化量; ES_{nb} , ES_{na} 与此相同。ESTD 表征某两种生态系统服务变化量相互作用的程度和方向;ESTD 为负时,表示第 m 与 n 种生态系统服务为权衡关系;ESTD 为正时,表示二者间为协同关系。

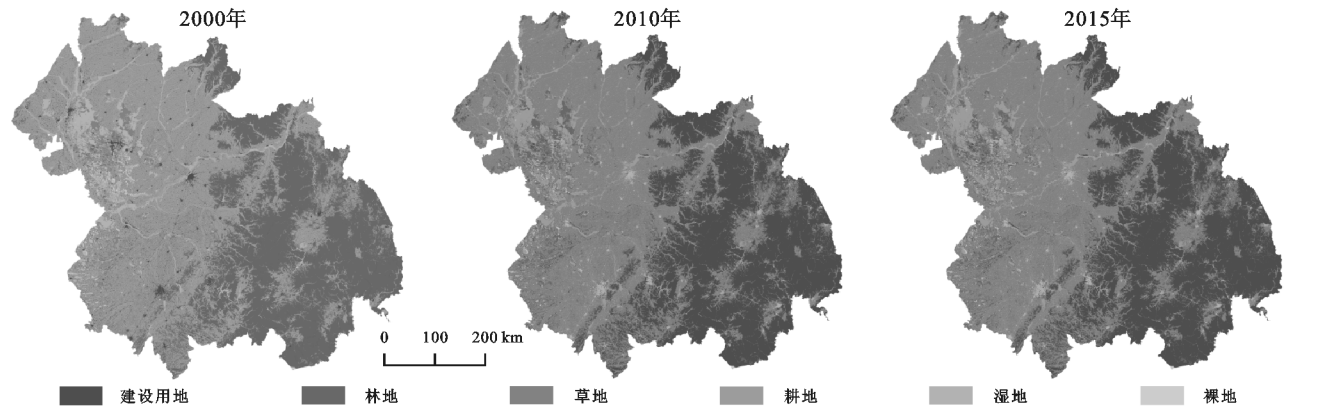


图 1 2000—2015 年哈长城市群土地覆被类型

研究区内的建设用地面积在 15 a 间持续增加,共增加 1 462 km²,总体趋势表现为先快后慢。15 a 间林地面积增加了 1 527 km²,总体趋势持续增加,2010—2015 年增加幅度大于 2000—2010 年。草地面积先增后减,共减少 661 km²。2015 年哈长城市群耕地面积占总面积的 50.46%,15 a 间耕地面积持

续减少,共减少 1 611 km²。湿地面积在 2000—2015 年先减后增,2000—2010 年减少 54 km²,2010—2015 年有所恢复,增加 117 km²,15 a 间共增加 63 km²。裸地包括采矿场、裸土、沙漠等,其面积在 2000—2010 年减少 1 031 km²,2010—2015 年增加了 251 km²。

表 1 2000—2015 年哈长城市群土地覆被类型变化

土地覆被类型	2000 年/km ²	2010 年/km ²	2015 年/km ²	2000—2010 年/km ²	2010—2015 年/km ²	2000—2015 年增长/%
建设用地	12451	13409	13913	958	504	11.74
林地	114871	115541	116398	670	857	1.33
草地	7294	7398	6633	104	-765	-9.07
耕地	164364	163717	162753	-647	-964	-0.98
湿地	21060	21006	21123	-54	117	0.30
裸地	2484	1453	1704	-1031	251	-31.40

3.2 生态系统服务的时空格局

哈长城市群 2000—2015 年土壤保持量空间分布格局见图 2,具体而言,哈长城市群土壤保持量的多年平均值为 21 107.53 t/km²,最低值在 2015 年(19 844.65 t/km²),最高值在 2000 年(21 934.19 t/km²)。从空间分布来看,哈长城市群的土壤保持能力呈东高西低态势,高值地区多分布在东南部;2000—2010 年土壤保持能力有所降低,降低的区域主要分布在黑龙江省的牡丹江市和哈尔滨市部分地区;2000—2010 年土壤保持能力增加的区域主要分布在吉林省的吉林市、长春市和辽源市部分地区。2010—2015 年土壤保持能力有所降低,降低的区域主要分布在东南部的延边朝鲜族自治州、吉林市和长春市等。

哈长城市群 2000—2015 年生态系统碳储量空间

3 结果与分析

3.1 2000—2015 年哈长城市群土地覆被变化

对哈长城市群 2000—2015 年 3 个时期遥感影像进行处理,将土地覆被类型划分为建设用地、林地、草地、耕地、湿地和裸地(图 1)。

分布格局见图 3,具体而言,生态系统碳储量多年平均值为 11 866.53 t/km²,最低值在 2010 年(11 837.88 t/km²),最高值在 2000 年(11 888.90 t/km²)。从空间分布来看,哈长城市群生态系统碳储量呈东部高西部低的态势,但 15 a 来其空间分布无明显差异,其高值地区多分布在西北部和东南部分地区;2000—2010 年区域生态系统碳储量有所降低,降低到区域主要为大庆市和松原市。2010—2015 年区域生态系统碳储量有所增加,增加区域主要分布在黑龙江省西部的大部分地区;吉林省各区域有所增加,但不明显。

哈长城市群 2000—2015 年产水量空间分布格局见图 4,具体而言,产水量多年平均值为 118 055.46 m³/km²,最低值在 2000 年(92 952.47 m³/km²),最高值在 2010 年

(133 045.84 m³/km²)。从空间分布来看,哈长城市群的产水量从东南部向西北部逐渐降低,高值区多分布在吉林省的东中部,黑龙江省的产水量相对于吉林省较低。由图 4 可知,2000—2010 年的产水量呈增加趋势,增

加的区域主要为吉林省大部分地区。2010—2015 年的产水量略有降低,降低的区域主要为吉林省大部分地区,且降幅较明显;2010—2015 年增加的区域主要为黑龙江省大部分地区。

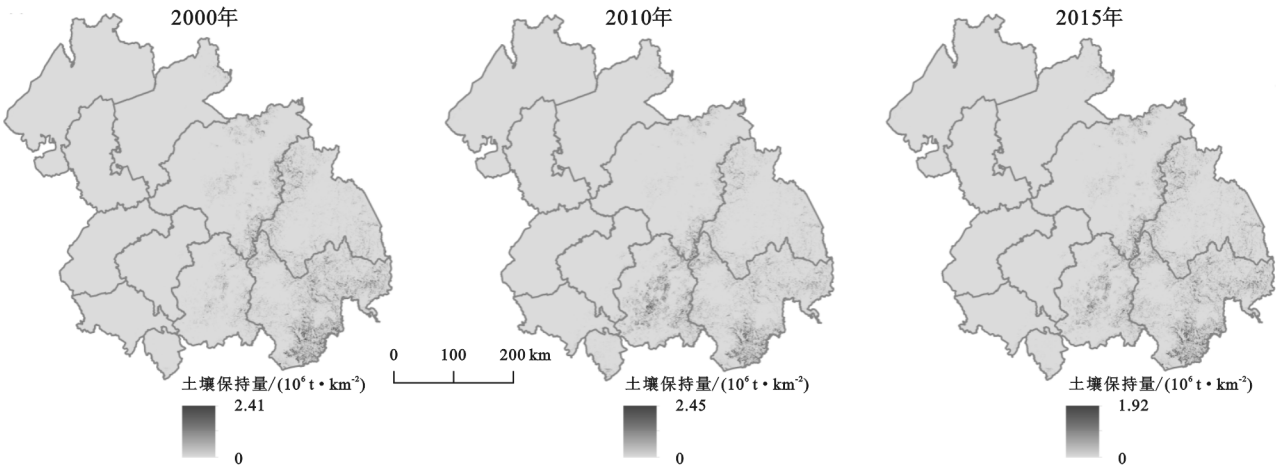


图 2 2000—2015 年哈长城市群土壤保持能力空间分布

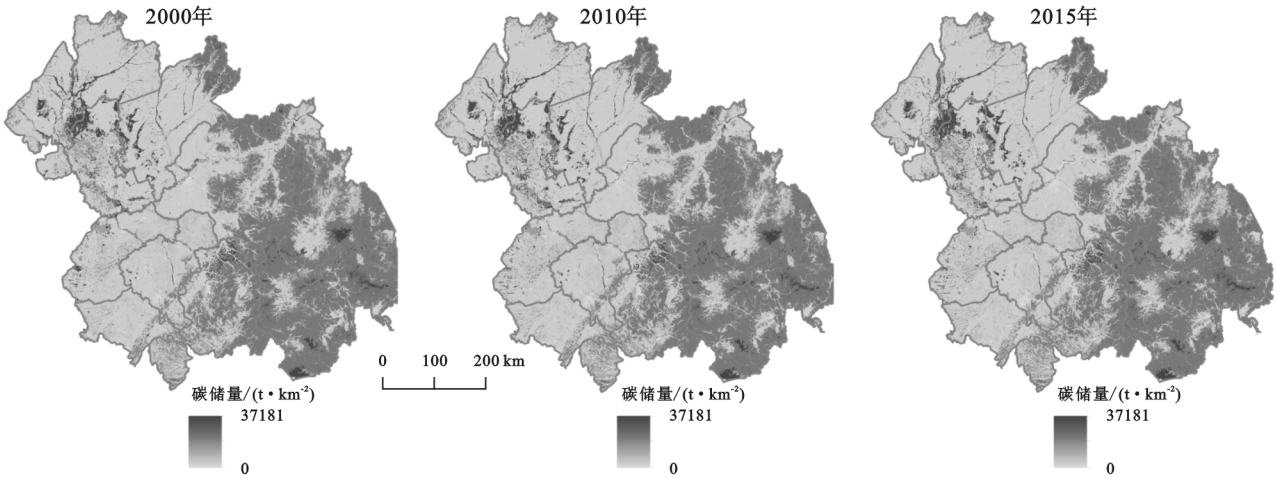


图 3 2000—2015 年哈长城市群生态系统碳储量空间分布

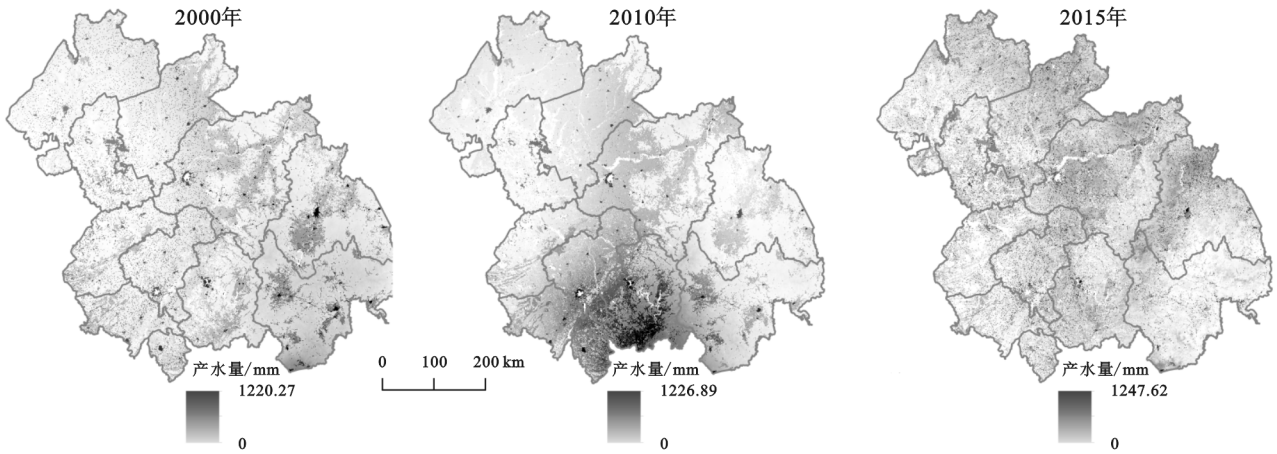


图 4 2000—2015 年哈长城市群产水量空间分布

3.3 不同土地覆被类型生态系统服务的差异

土地覆被对生态系统服务产生的影响,主要表现为同种土地覆被类型中不同生态系统服务间的差异和同一生态系统服务中不同土地覆被类型间的差异。本

研究结合土地覆被数据,将哈长城市群 3 种生态系统服务的均值提取至各土地覆被类型,得出不同土地覆被类型下的生态系统服务(图 5)。不同的土地覆被类型间,林地提供的土壤保持力最高,产水量最低;草地

和湿地提供的生态系统碳储量最高,土壤保持力最低;耕地提供的产水量最高,生态系统碳储量最低;建设用地提供的土壤保持力最高,生态系统碳储量最低;裸地提供的产水量最高,土壤保持力最低。不同土地覆

被类型提供的土壤保持能力从高至低依次为:林地>耕地>建设用地>湿地>草地>裸地;生态系统碳储量:湿地>林地>草地>耕地>裸地>建设用地;产水量:湿地>耕地>林地>裸地>草地>建设用地。

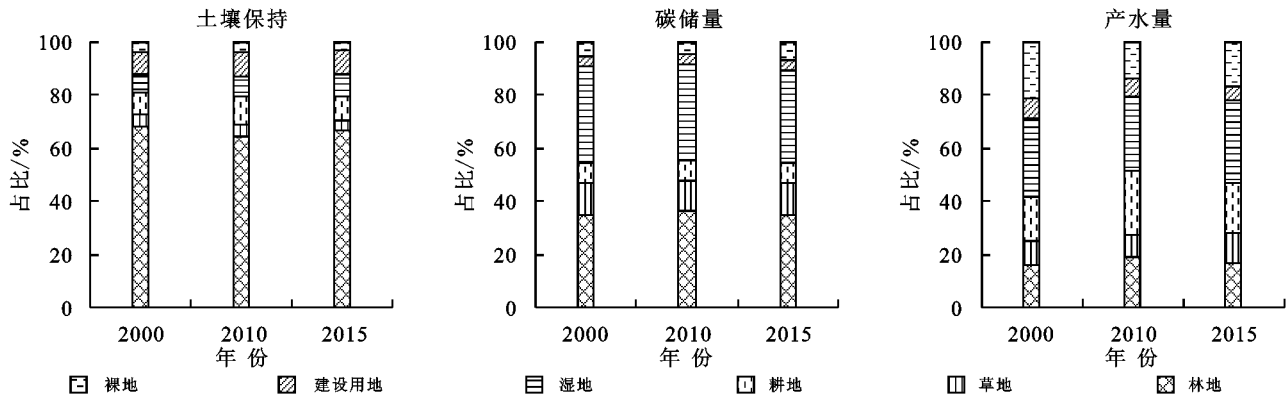


图 5 2000—2015 年哈长城市群不同土地类型的生态系统服务

3.4 生态系统服务的权衡与协同关系

3.4.1 生态系统服务关联关系 以 30 m 分辨率的栅格数据为基础,对哈长城市群土壤保持、生态系统碳储量和产水量 3 种生态系统服务进行样点采集,在研究区内获取均匀分布的点共 29 205 个,在 SPSS 软件支持下,对研究区 3 种生态系统服务做出相关性分析(表 2)。其中哈长城市群的土壤保持与生态系统碳储量及土壤保持与产水量的相关系数均大于 0,表

征土壤保持与二者间均是协同关系;生态系统碳储量与产水量的相关系数小于 0,表明这组服务间呈现权衡关系。15 a 来,随着哈长城市群植被覆盖度的增多,使土壤的抗冲蚀能力显著增强,即土壤保持能力显著提高;植被覆盖度的增多同时促使其蒸腾耗水的需求不断提高,使得降水日渐成为主导土壤保持能力和产水量的首要因子。

表 2 2000—2015 年哈长城市群生态系统服务的相关系数

[illegible]

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关(双尾)。

3.4.2 生态系统服务权衡协同度 在行政区范围内设置采样间隔点的距离为 5 km,在研究区各市域内共获取 77 412 个均匀分布的点,基于哈长城市群行政区划图,对哈长城市群 2000—2015 年生态系统服务变化量的栅格图进行样点采集,以估算 3 种生态系统服务间的权衡协同度(图 6)。协同作用是哈长城市群 3 种生态系统服务间的主导关系,其中土壤保持—生态系统碳储量间的协同程度最高。南部吉林省境内的辽源市、吉林市、四平市在生态系统服务间关联关系中,土壤保持—生态系统碳储量的协同度最为明显,分别为 9.12, 8.21, 7.10, 辽源市的土壤保持—产水量的协同度高于其他各市,协同度为 3.76。其他服务间的协同程度较低,主要是南部地区以林地为主,随着地表植被状况的改善,土壤保持量与生态系统碳储量显著提高。北部黑龙江省境内各市多以权衡为主,协同程度较低,其中齐齐哈尔市、牡丹江市、哈尔滨市土壤保持—生态系统碳储量的权衡度分

别为 2.60, 1.89, 1.75, 主要原因是随着城市化进程的加快及重工业的快速发展, 地表植被遭到破坏, 再加上降水相对较少, 导致对土壤保持量和生态系统碳储量的急剧下降。

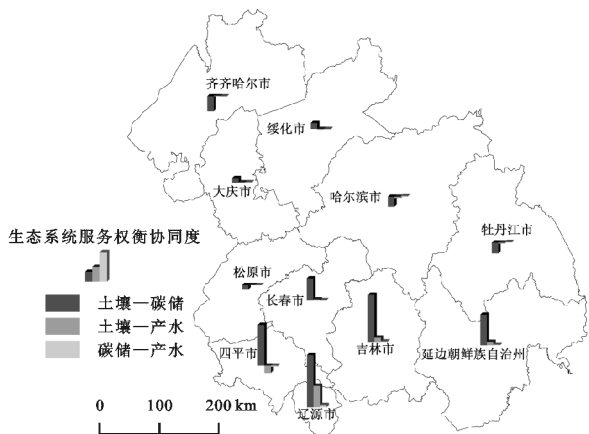


图 6 2000—2015 年哈长城市群生态系统服务间
权衡协同度分布

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究从土地覆被角度出发,发现哈长城市群的生态系统服务及其权衡协同关系与土地覆被类型空间分布有着紧密关系,林地和湿地面积的增加都会对土壤保持、碳储量和产水量产生促进作用,而建设用地的增加会致使3种服务的减少。因此,农业活动、退耕还林还水等可以在不同程度上增加生态系统服务价值量,而城镇化的快速发展不利于维持生态系统平衡。

潘竞虎等^[38]在干旱内陆河流域的研究表明碳储量和产水量间呈现出明显的协同作用,但本研究的结果显示哈长城市群的碳储量和产水量为权衡关系;Wang等^[39]在黄土高原的研究结果表明,植树造林过程不仅没有提升降雨量,同时还造成大量水资源浪费,以上表明了生态系统服务间的权衡与协同具有一定的地理位置及时空差异性。

生态系统中存在多种多样的服务机制,本研究仅选取了其中3种进行解析,关于哈长城市群区域内生态系统服务的权衡协同关系研究还不够完善。在未来的研究过程中更应从数据来源、尺度方面、生态系统服务多样性等方面进行多元化研究,以期为后续学者在进行相关研究时提供一定帮助,为哈长城市群地区制定更为全面具体的区域发展和生态保护策略提供参考意见。

4.2 结论

本研究以处于东北腹地的哈长城市群作为研究区,计算了各年份间土地覆被类型的面积变化,利用相关模型定量测算了2000—2015年的土壤保持、生态系统碳储量和产水量3种生态系统服务的时空分布格局及不同土地覆被类型生态系统服务的差异,并利用权衡协同度模型分析了哈长城市群3种生态系统服务间的权衡协同关系,旨在实现区域经济稳定发展及生态环境保护的“共赢”提供参考依据。主要结论如下:

(1) 2000—2015年哈长城市群林地、湿地、建设用地面积增加,耕地、草地、裸地面积相对减少,其中,建设用地增长率最高,裸地减少率最高。

(2) 土壤保持价值量呈东高西低的空间格局,高值区多分布于东南部;生态系统碳储量呈东高西低的格局分布,整体上与土地覆被类型分布较一致;产水量呈东南部向西北部逐渐降低的空间格局,高值地区多分布在吉林省的东中部。

(3) 不同土地覆被类型间的生态系统服务对比

结果显示,林地、草地等6种土地覆被类型的3种生态系统服务都呈现此消彼长的变化方式。

(4) 从相关性方面看,土壤保持与生态系统碳储量、土壤保持与产水量间呈正相关关系,生态系统碳储量与产水量间呈负相关现象;通过生态系统服务的权衡协同度分析可以看出,哈长城市群南部土壤保持—生态系统碳储量协同度较为显著,土壤保持—产水量次之,北部的土壤保持—生态系统碳储量多以权衡为主。

参考文献:

- [1] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington D C: Island Press, 1997.
- [2] Costanza R, Darge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.
- [3] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services [J]. Ecology Letters, 2009,12(12):1394-1404.
- [4] 李双成,张才玉,刘金龙,等.生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J].地理研究,2013,32(8):1379-1390.
- [5] Qiu J, Turner M G. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(29):12149-12154.
- [6] Rodriguez J, Beard Jr T D, Bennett E, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services [J]. Ecology and Society, 2006,11(1),709-723.
- [7] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡:方法、模型与研究框架[J].地理研究,2016,35(6):1005-1016.
- [8] 李鹏,姜鲁光,封志明,等.生态系统服务竞争与协同研究进展[J].生态学报,2012,32(16):5219-5229.
- [9] 曹祺文,卫晓梅,吴健生.生态系统服务权衡与协同研究进展[J].生态学杂志,2016,35(11):3102-3111.
- [10] Li Y, Zhang L, Qiu J, et al. Spatially explicit quantification of the interactions among ecosystem services [J]. Landscape Ecology, 2017,32(6):1181-1199.
- [11] Vidal-Legaz B, Martínez-Fernández J, Picón A S, et al. Trade-offs between maintenance of ecosystem services and socio-economic development in rural mountainous communities in southern Spain: a dynamic simulation approach[J]. Journal of Environmental Management, 2013,131:280-297.
- [12] MA (Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystem and Human Well-Being[J]. Washington D C: Island Press, 2005.

- [13] Smith P, Ashmore M R, Black H I J, et al. The role of ecosystems and their management in regulating climate, and soil, water and air quality [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 50(4): 812-829.
- [14] 冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 等. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 995-1004.
- [15] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [16] Kragt M E, Robertson M J. Quantifying ecosystem services trade-offs from agricultural practices[J]. *Ecological Economics*, 2014, 102: 147-157.
- [17] Richards D R, Friess D A. Characterizing coastal ecosystem service trade-offs with future urban development in a tropical city [J]. *Environmental Management*, 2017, 60(5): 961-973.
- [18] 饶胜, 林泉, 王夏晖, 等. 正蓝旗草地生态系统服务权衡研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 81-86.
- [19] 葛菁, 吴楠, 高吉喜, 等. 不同土地覆被格局情景下多种生态系统服务的响应与权衡: 以雅砻江二滩水利枢纽为例[J]. *生态学报*, 2012, 32(9): 2629-2639.
- [20] 李慧颖. 基于遥感和 InVEST 模型的辽宁省退耕还林工程生态效应评估[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [21] Wang Z M, Mao D H, Li L, et al. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 1992—2012 in the Sanjiang Plain of China[J]. *Science of Total Environment*, 2015, 514: 119-130.
- [22] Mao D H, He X Y, Wang Z M, et al. Diverse policies leading to contrasting impacts on land cover and ecosystem services in Northeast China [J]. *Journal of Clean Production*, 2019, 240: 117961.
- [23] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Washington D C: Agricultural Handbook, 1978.
- [24] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. *资源科学*, 2003, 25(1): 35-41.
- [25] Williams J R. EPIC: the Erosion-Productivity Impact Calculator[J]. *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, 1990, 4(4): 206-207.
- [26] Zhang L W, Fu B J, Lü Y H, et al. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting [J]. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 535-546.
- [27] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
- [28] 蒋春丽, 张丽娟, 张宏文, 等. 基于 RUSLE 模型的黑龙江省 2000—2010 年土壤保持量评价[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(5): 642-649.
- [29] 袁志芬, 黄桂林, 莫宏伟, 等. 四川省宝兴县生态系统生物碳储量动态评估[J]. *林业资源管理*, 2014(1): 82-88.
- [30] 王治良. 嫩江流域湿地自然保护区空缺(GAP)分析[D]. 哈尔滨: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2016.
- [31] Lu N, Sun G, Feng X M, et al. Water yield responses to climate change and variability across the North-South Transect of Eastern China(NSTEC)[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 481: 96-105.
- [32] 王耕, 韩冬雪. 基于 InVEST 模型的大凌河上游汇水区水源涵养功能评估[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(3): 206-211.
- [33] Donohue R, Roderick M, Mcvicar T. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 436/437: 35-50.
- [34] Yang H, Yang D, Lei Z, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(3): 893-897.
- [35] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 [M]. Rome, Italy: Fao-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [36] 孟庆林. 基于生态系统服务变化的长白山地区土地利用/覆被优化研究[D]. 吉林延边: 延边大学, 2019.
- [37] 李鸿健, 任志远, 刘焱序, 等. 西北河谷盆地生态系统服务的权衡与协同分析: 以银川盆地为例[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1731-1738.
- [38] 潘竟虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 280-289.
- [39] Wang C, Wang S, Fu B J, et al. Precipitation gradient determines the trade off between soil moisture and soil organic carbon, total nitrogen, and species richness in the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 1538-1545.