

黄河流域城镇化与生态系统服务的时空互动关系

邵雅静^{1,2}, 杨悦^{1,2}, 员学锋^{1,2}

(1.长安大学土地工程学院,西安 710054;2.陕西省土地整治重点实验室,西安 710054)

摘要:黄河流域是中国重要的生态廊道,黄河流域的生态安全关系着全国的生态安全水平。理清城镇化与生态系统服务之间的空间互动关系是黄河流域可持续发展的基础。通过分析 2000—2018 年黄河流域城镇化发展特征以及生态系统服务的空间分布格局,利用 Pearson 相关系数和双变量空间自相关方法进一步揭示了黄河流域城镇化和生态系统服务的时空作用关系及演变特征。结果表明:(1)2000—2018 年黄河流域城镇化水平整体提升,综合城镇化指数增长了 102.60%,经济城镇化发展速度普遍高于土地城镇化和人口城镇化,城镇化水平具有显著的空间差异性;(2)2000—2018 年黄河流域粮食生产、固碳和土壤保持分别增长了 65.32%,59.47%和 46.27%,而产水服务减少了 21.15%;(3)黄河流域城镇化与生态系统服务之间的关系在时空尺度上表现出了正向效应的减弱和负向效应的增强,并且城镇化和生态系统服务发展不协调的区域在不断扩张。

关键词:生态系统服务;城镇化;双变量空间自相关;黄河流域

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)03-0086-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.013

Analysis of the Spatial and Temporal Interactions Between Urbanization and Ecosystem Services in the Yellow River Basin

SHAO Yajing^{1,2}, YANG Yue^{1,2}, YUAN Xuefeng^{1,2}

(1.School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054;

2.Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an 710054)

Abstract: As an important ecological corridor in China, the Yellow River Basin (YRB) plays an important role in maintaining China's ecological security. Understanding the spatial interactions between urbanization and ecosystem services is the basis for sustainable regional development. Based on the characteristics of urbanization development and the spatial distribution pattern of ecosystem services in the YRB from 2000 to 2018, the spatial and temporal interaction relationship and evolutionary characteristics of urbanization and ecosystem services in the YRB were further revealed using Pearson correlation coefficient and bivariate spatial autocorrelation. The results showed that: (1) The urbanization of the YRB had a significant spatial heterogeneity, and the comprehensive urbanization index increased from 2000 to 2018, with a growth rate of 102.60%, among which the development of economic urbanization was generally faster than that of land urbanization and population urbanization. (2) Food production, carbon sequestration services and soil conservation in the YRB increased by 65.32%, 59.47% and 46.27%, respectively, while water yield decreased by 21.15%. (3) The relationship between urbanization and ecosystem services in the YRB from 2000 to 2018 showed a weakening of the positive effect and an increase of the negative effect at both spatial and temporal scales, and the areas where the development of urbanization is not coordinated with ecosystem services are expanding.

Keywords: ecosystem services; urbanization; bivariate spatial autocorrelation; Yellow River Basin

城镇化是社会经济发展、土地利用模式转变,生态环境变化和生活方式转型的多维发展过程^[1]。改革开放以来,中国的城镇化发展取得了显著成果,城镇化率

从 1978 年的 17.9%增长到了 2019 年的 60.6%,城镇化率整体提高了 42.7%(《中国城市建设统计年鉴》)^[2]。在城镇化过程中,生态破坏、环境污染、资源

收稿日期:2021-11-03
资助项目:陕西省土地整治重点实验室基金项目(211927190123);长安大学中央高校基本科研业务费专项(300102270207)
第一作者:邵雅静(1990—),女,在读博士研究生,主要从事城乡发展和生态系统服务研究。E-mail:ynllsyj@163.com
通信作者:员学锋(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事乡村振兴、农村贫困化研究。E-mail:zyxfyun@chd.edu.cn

浪费等问题逐渐凸显^[3]。人类活动逐渐加速了生态系统服务的退化,进一步扩大了生态系统服务的失衡,威胁人类福祉和全球的可持续发展^[4]。城镇化是社会经济发展不可避免的过程,如何平衡城镇化发展和生态系统保护是区域可持续发展的关键问题。

生态系统服务的概念萌芽于20世纪60年代^[5]。生态系统服务是指人类可以直接或者间接的从自然生态系统获得的,可以用于生产、生活的福祉和惠益^[6]。城镇化是影响生态系统结构、功能以及服务之间权衡协同关系的重要驱动因素^[7]。社会经济发展提高了人们对生态系统服务的需求水平^[8]。人口集聚导致了自然资源的再分配,同时也增加了粮食、水资源以及能源的消耗。城市建设用地扩张对耕地、林地和草地等生态用地的侵占,加剧了生态系统服务供给类型和供给数量的减少^[9]。理清城镇化和生态系统服务之间的作用关系成为生态系统服务领域的研究热点。近年来,研究多关注于快速城镇化地区生态系统服务的时空演变特征^[10],且侧重于量化生态系统服务的经济价值,探析城镇化过程对生态系统服务价值的影响^[11],少有研究关注城镇化指标如人口城镇化、土地城镇化和经济城镇化对生态系统服务供给的影响。目前针对黄河流域的研究较少,已有研究主要包括黄河流域生态系统服务之间的权衡关系量化^[12],生态系统服务的供给和需求测算^[13],土地利用驱动下的生态系统服务价值变化^[14],以及社会经济发展对生态系统服务的影响^[15],也有研究者^[16]开始关注黄河流域城镇化与生态系统服务之间的耦合协调关系。然而,少有研究揭示城镇化系统与生态系统服务供给之间的空间互动关系。因此,亟需从时空角度出发,深入探讨生态系统服务与城镇化之间的空间作用关系,为区域的生态管理工作提供一定支撑。

黄河流域是中国重要的生态屏障区和经济发展区^[17]。2018年黄河流域9个省区总人口4.2亿人,占全国总人口的30.3%,地区生产总值23.9亿元,占全国的26.5%^[18]。黄河流域生态环境脆弱,自然资源短板明显,区域经济发展不平衡问题凸出。因此在合理制定区域生态保护策略的需求下,如何实现城镇化和生态系统服务的协调发展是亟待解决的问题。基于此,本文分析了黄河流域2000—2018年人口城镇化、经济城镇化和土地城镇化过程,并且借助InVEST模型、RUSLE模型、CASA等生物物理模型评估了粮食生产、产水、土壤保持和固碳服务的时空变化,采用Pearson相关系数法和双变量空间自相关方法分析了城镇化与生态系统服务在县域层面上的相互作用关系,以期为黄河流域生态保护与可持续发展提供借鉴和参考。

1 研究区概况

黄河流域位于95°50′29″—119°6′26″E,32°6′53″—41°48′18″N,流域总面积达79.5万km²。流经四川、甘肃、宁夏、内蒙、青海、陕西、山西、河南和山东9个省,总面积359.76万km²。黄河流域横跨了中国的东中西三大区域,是我国重要的能源基地和重工业基地。本研究将黄河干、支流所流经的县域作为本文的黄河(沿黄)流域范围,共涉及9个省级行政单元,86个市级行政单元和400个县级行政单元(图1)。

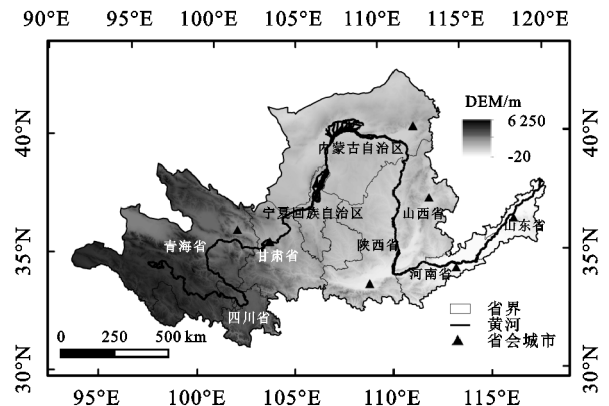


图1 研究区地理位置和高程

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

(1)土地利用数据来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率为30 m×30 m,采用中科院土地资源分类,主要分为6大类,耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。

(2)气象数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),包括降雨、温度、日照时间和平均风速等;

(3)高程数据(DEM)和NDVI数据来源于地理空间数据云平台,空间分辨率分别为90,250 m;

(4)矢量数据(全国行政区划图,黄河流域矢量范围)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)和国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>);

(5)土壤数据(土壤类型、土壤质地、土壤有机质含量和根系深度等)来源于兰州寒旱所提供的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database v1.2),比例尺为1:100万;

(6)1 km网格人口密度数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>);

(7)统计数据来源于青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙、陕西、山西、山东、河南9省区2000—2018年的统计年鉴;

对于不同来源的数据,在 ArcGIS 中进行重采样和投影转换,最终都将投影坐标统一为 Krasovsky_1940_Albers,分辨率统一为 1 km。

2.2 研究方法

2.2.1 服务的量化

(1)粮食生产。参考李双成等^[19]的研究成果,根据不同土地利用类型的 NDVI 值将粮食、油料、水果和蔬菜按照农用地面积,肉类和奶类按照草地面积,水产品按照水域面积进行空间化处理,最终获得全部土地利用类型上的粮食供给空间分布特征,具体计算过程为:

$$FP_{ij} = \frac{NDVI_{ij}}{NDVI_i} \times FP_i$$

式中: FP_{ij} 为第 i 个地市第 j 个栅格的粮食产量; FP_i 为第 i 个地市的粮食产量 (kg/hm^2); $NDVI_{ij}$ 为第 i 个地市第 j 个栅格的 NDVI; $NDVI_i$ 为第 i 个地市的 NDVI。

(2)产水服务。本研究使用 InVEST 模型中的产水模型(water yield)来量化黄河流域的产水量,该模型基于 Budyko 水热耦合平衡假设,将区域的产水量近似等于年均降水量和实际蒸散发的差值^[20],计算公式为:

$$Y(x) = (1 - \frac{AET(x)}{P(x)}) \times P(x)$$

式中: $Y(x)$ 为栅格单元 x 的年产水量 (mm); $AET(x)$ 为栅格单元 x 的年实际蒸发量 (mm); $P(x)$ 为栅格单元 x 的年降水量 (mm)。

(3)固碳服务。植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)可以直接反映植被群落在自然环境条件下的生产力,表征固碳服务^[21]。CASA(carnegie ames-stanford approach)模型被广泛用于估算全球生态系统服务的净初级生产力,计算公式为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t)$$

式中: $NPP(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的净初级生产力 ($\text{g C}/\text{m}^2$); $APAR(x, t)$ 为像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射 (MJ/m^2); $\epsilon(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的实际光能利用率 ($\text{g C}/\text{MJ}$)。

(4)水土保持。土壤保持量(soil conservation)是潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量之间的差值^[22],修改的土壤流通方程 RUSLE(revised universal soil loss equation)被广泛应用到土壤侵蚀量的计算过程中^[23],计算公式为:

$$SC = RKLS - USLE = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$$

式中: SC 为土壤保持量 ($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); $RKLS$ 为在没有植被覆盖和水土保持措施下土壤的潜在侵蚀量; $USLE$ 为区域土壤的实际侵蚀量; R 为降雨侵蚀性因

子 ($(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$),通过 Wischmeier 等^[23]提出的公式计算; K 为土壤可蚀性因子 ($(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{mm})$),利用 Williams 等^[24]提出的 EPIC 公式计算; L 和 S 分别为坡长和坡度因子,坡长采用 Wischmeier 等^[25]提出的公式计算,坡度因子采用 Mc Cool 等^[26]提出的公式计算; C 为植被覆盖因子,参照蔡崇法等^[27]的研究成果计算; P 为水土保持措施因子,参考 Lufafa 等^[28]方法计算。

2.2.2 城镇化指标 城镇化主要表现为区域经济增长、人口集聚和城市用地的扩张。根据黄河流域的城镇化现状和数据的可获性,本文主要从人口、土地和经济 3 个城镇化维度来分析黄河流域的城镇化过程,采用人口密度 ($\text{人}/\text{km}^2$)、GDP 密度 ($\text{万元}/\text{km}^2$) 和建设用地占比 (%) 来分别表示人口城镇化、经济城镇化和土地城镇化指标,用 3 个指标标准化处理之后的叠加结果表示综合城镇化指数(comprehensive urbanization index, CUI)。

2.2.3 两者关系量化

(1)Pearson 相关系数。本研究运用相关系数法分析城镇化与生态系统服务之间关系的时序演变特征。若相关系数为正并且通过了显著性检验则为正相关,相关系数为负并且通过了显著性检验则为负相关。具体的计算过程为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中: R_{xy} 为相关系数; n 为样本数; x_i, y_i 分别为 x, y 的第 i 个值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 x 和 y 的平均值。

(2)双变量空间自相关分析。本研究采用双变量空间自相关(bivariate spatial autocorrelation analysis)分析城镇化与生态系统服务在空间上的相关特征及分布情况。双变量全局自相关和局部自相关方法能够反映 2 个变量在整个研究区的相关关系以及空间关系的局部集聚特征^[29]。Moran's I 取值 $[-1, 1]$, Moran's $I > 0$ 表示正相关, Moran's $I < 0$ 表示负相关, Moran's $I = 0$ 则表示属性值是随机分布的。借助 GeoDa 软件,在 Z 值检验 ($P = 0.05$) 的基础上绘制 LISA 聚类图(local Indicator of spatial association)来反映城镇化和生态系统服务在空间上的依赖性和关联性。输出结果包括:高值聚类(HH)、低值聚类(LL)、高低集聚(HL)、低高集聚(LH)和不相关(NN)。

3 结果与分析

3.1 2000—2018 年黄河流域的城镇化发展过程

由图 2 可知,2000—2018 年黄河流域综合城镇化水平普遍有所提升,综合城镇化率提高了 102.60%,

其中人口城镇化(人口密度)均值从 2000 年的 269.56 人/km² 增加到了 2018 年的 322.70 人/km²,土地城镇化(建设用地占比)均值从 2000 年的 5.12% 增长到了 2018 年的 8.06%,经济城镇化(GDP 密度)均值从 2000 年的 228.56 万元/km² 增长到了 2018 年的 1 792.07 万元/km²,变化幅度分别为 19.71%,57.36%,684.06%。从变化速率来看,整体表现为经济城镇化速度>土地城镇化速度>人口城镇化速度。

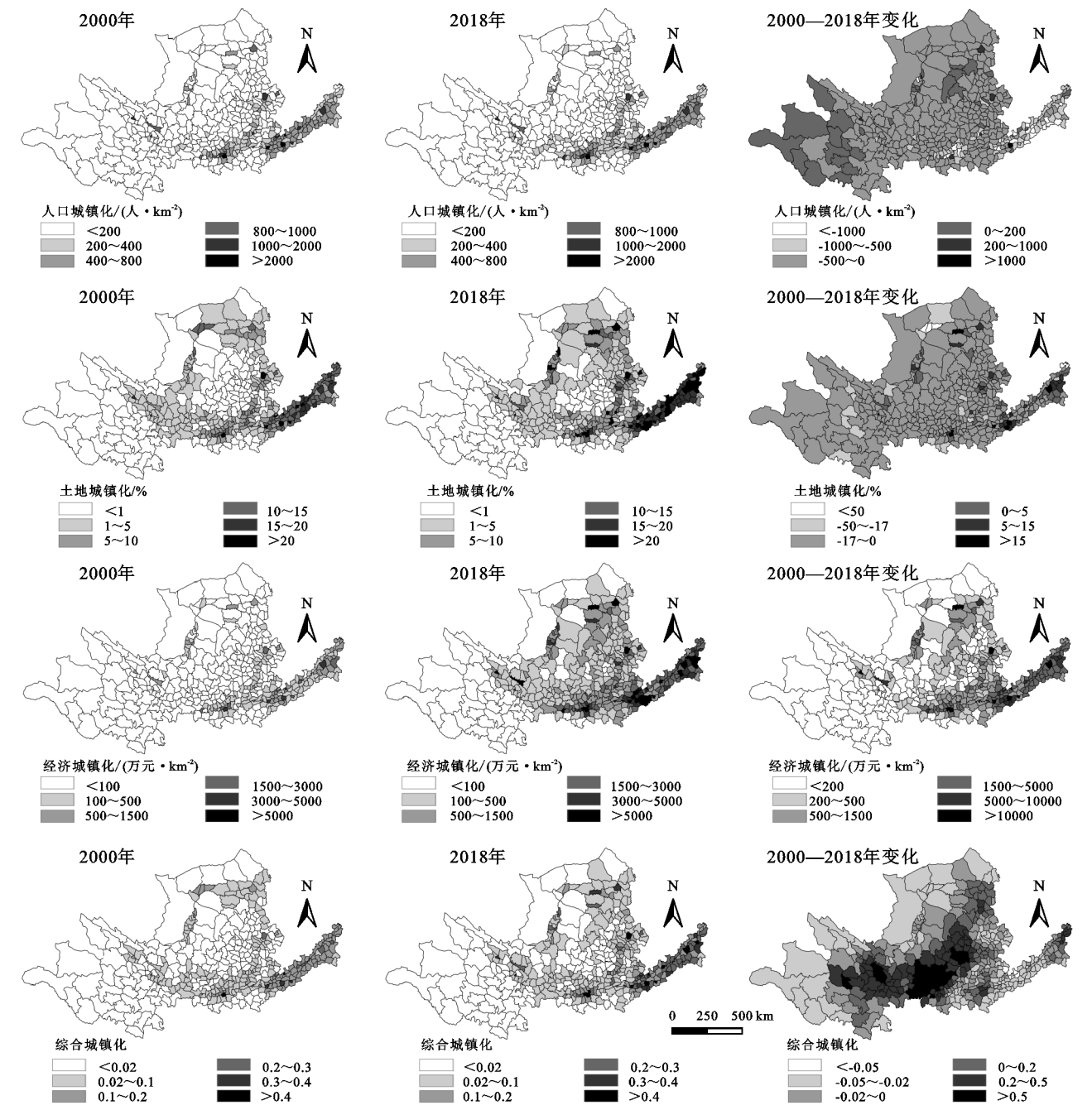


图 2 2000—2018 年黄河流域城镇化空间分布格局及变化

从城镇化指标的空间分布特征来看,人口城镇化、土地城镇化和经济城镇化的区域不平衡特征显著。2000—2018 年黄河流域 78.25% 的地区人口密度有所增加,同时 21.75% 的地区人口密度有所减少。2000—2018 年黄河上游地区人口密度基本处于 200 人/km² 以下,人口密度>800 人/km² 的地区基本分布在下游的山东省和河南省以及中游的陕西省和山西省。2000—2018 年黄河流域 94.25% 地区建设用地的占比呈增长趋势,而 5.75% 的地区建设用地的占比有所减少,黄河中下游地区土地城镇化的集聚特征最为显著。2000—2018 年黄河流域建设用地占比超过 20% 的地区面积占比从 2000 年的 5% 左右增长到了 2018 年 24%。2000—2018 年黄河流域 GDP 密度整体增加,经济城镇化水平普遍提升且增长的区域主要分布在省会城市及其周边地区。整体来看,黄河流域的城镇化过程具有显著的空间差异性,黄河中下游地区的经济发展优势和人口集聚程度显著高于上游地区,是黄河流域人口城镇化、经济城镇化和土地城

镇化的核心地区。

3.2 2000—2018 年黄河流域生态系统服务的空间分布特征

2000—2018 年黄河流域的粮食生产、固碳和土壤保持服务均值分别增长 65.32%，59.47%，46.27%，而产水服务均值减少 21.15%（图 3）。整体来看，黄河流域 70% 以上的地区粮食生产、固碳和土壤保持呈现增长趋势。2000—2018 年黄河流域粮食生产的增长区集中分布在下游的山东省和河南省，这些地区位于华北平原，水热资源丰富，平均粮食单量高于 4 000 kg/hm²。2000—2018 年固碳服务在黄河中下游地区的增长最为显著，2018 年固碳服务的高值区主要集中在黄河中游陕西省

南部的秦巴山区，固碳服务均值基本大于 500 g C/m²，这些地区植被覆盖度较高，是我国可持续发展的生物基因库，也是我国重要的生态屏障之一，固碳服务供给优势明显。2000—2018 年土壤保持服务在整个黄河流域呈增长趋势，位于黄河上游的青海省东南地区增长最为显著，这些地区位于青藏高原，植被覆盖度较高，区域的土壤保持能力较强。2000—2018 年黄河流域的产水服务均值由 2000 年 93.40 mm 减少到 2018 年的 73.65 mm，产水服务在黄河上游青海省地区增长显著，而在中下游地区普遍减少，减少的区域占黄河流域总面积的 55.50%，主要分布在山西省和河南省的交界地区。

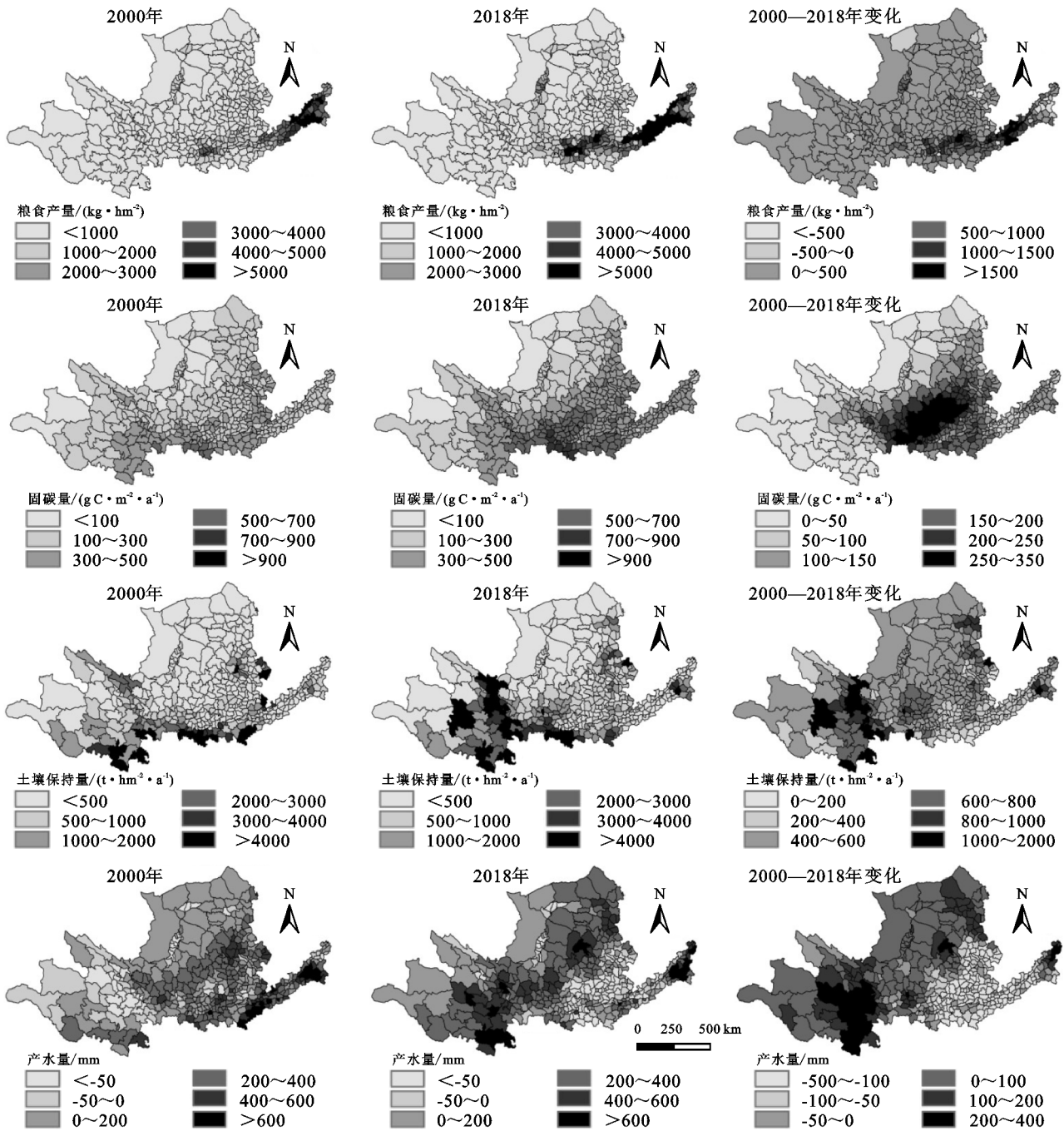


图 3 2000—2018 年黄河流域生态系统服务的空间分布特征及变化

从综合服务的变化特征来看,2000—2018 年黄河流域综合生态系统服务普遍增长,综合生态系统服务均值增长 21.09%,增长的区域占比 98.50%。

从分布特征来看,位于黄河流域中游的甘肃省

庆阳市和平凉市增长最为显著,增长量均高于 0.3,其次为中游地区陕西省的延安市和宝鸡市,增长量在 0.2~0.3(图 4),黄河中下游地区的综合生态系统服务显著高于上游地区。

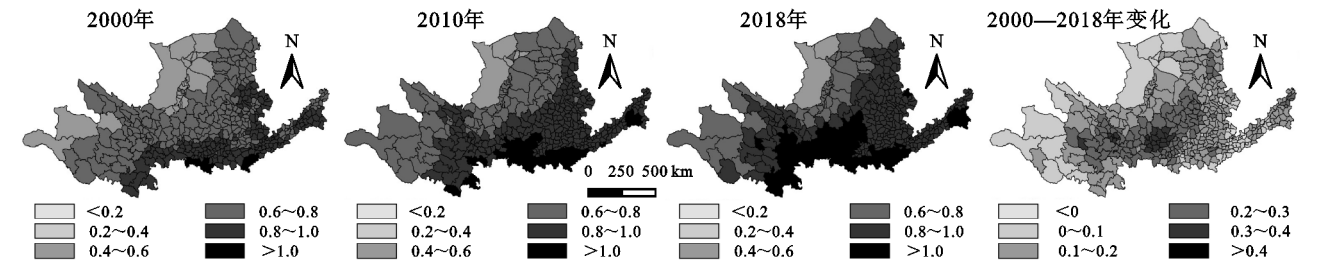
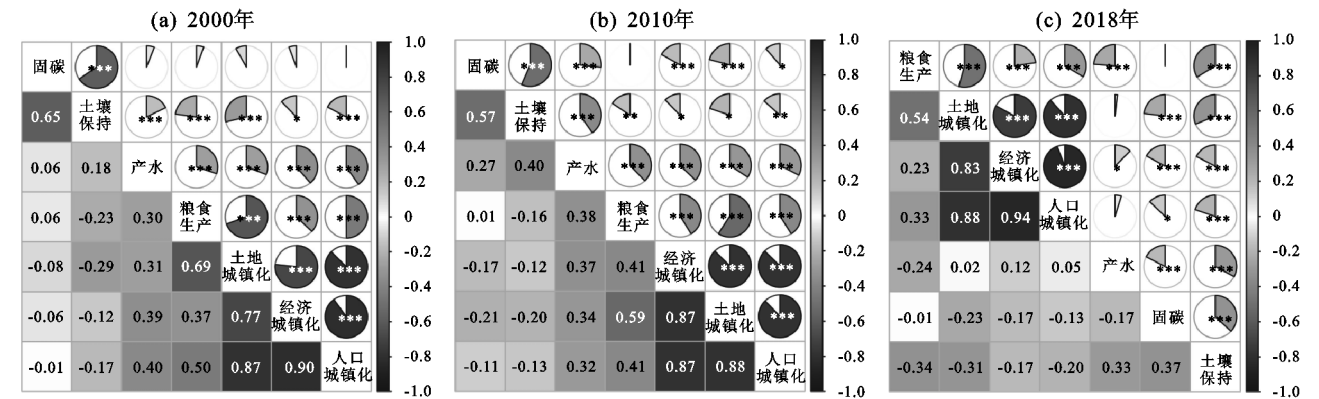


图 4 2000—2018 年黄河流域综合生态系统服务时空分布及变化趋势

3.3 黄河流域城镇化和生态系统服务的时空关系分析

(1)2000—2018 年黄河流域城镇化和生态系统服务的相关关系。本文利用 Pearson 相关系数量化了黄河流域城镇化和生态系统服务之间关系的时序特征(图 5)。2000—2018 年黄河流域城镇化指标和生态系统服务之间均具有显著的相关性,其中土地城镇化、人口城镇化和经济城镇化对固碳和土壤保持服务有消极影响

($R<0$),而对产水服务和粮食生产有一定的积极影响($R>0$)。随着时间的变化,城镇化对生态系统服务的影响程度在不断的变化。土地城镇化、人口城镇化和经济城镇化对固碳服务和土壤保持的影响在不断的加强,而对粮食生产和产水服务的影响有所减弱,也就是说在时间尺度上城镇化发展对生态系统服务的积极影响正在减弱而消极影响正在增强。



注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$; *** 表示 $p<0.001$ 。

图 5 2000—2018 年黄河流域城镇化和生态系统服务之间的相关系数

(2)2000—2018 年黄河流域城镇化和生态系统服务的空间关系。为了进一步揭示城镇化与生态系统服务在空间上的作用关系,本文借助 GeoDa 软件来分析黄河流域城镇化与生态系统服务之间的空间互动关系。在 1% 的显著性水平下,2000 年、2010 年和 2018 年城镇化和生态系统服务之间的 Moran' I 指数分别为 0.140 0, 0.090 4, -0.045 7(图 6)。从全局自相关结果来看,黄河流域城镇化与生态系统服务之间的空间关系从正相关关系逐渐转变成为负相关关系。

在 LISA 聚类结果(图 6)中,HH 代表城镇化和生态系统服务高值—高值相聚集的状态,即高城镇化水平对应了较高的生态系统服务水平;HL 表示城镇化和生态系统服务的高值—低值聚集状态,即城镇化水平高而生态系统服务水平低;LH 和 HL 则刚好相反;LL 则代表城镇化和生态系统服务的低—低聚集

状态,即区域的城镇化水平低且生态系统服务水平也较低。黄河流域城镇化与生态系统服务 HH 区分布较少且零星分布在黄河中下游地区,2000—2018 年 HH 区分布面积减少 5.5%,LL 区分布面积减少 1.75%。LL 分布在黄河流域上游以及中游的北部地区,黄河上游是典型的城镇化发展滞后区,尤其是上游地区的青海、内蒙和甘肃等地,脆弱的生态环境和匮乏的水资源很大程度上限制了区域的土地资源开发和规模利用,制约了城镇化发展。2000—2018 年 HL 区和 LH 区分别增加 0.25% 和 7.75%,其中 LH 区主要分布在黄河流域南部,HL 零星分布在黄河上游地区的内蒙地区。整体来看,黄河流域城镇化和生态系统服务之间发展不协调的地区逐渐增多。因此,基于城镇化和生态系统服务之间的空间关系因地制宜地制定区域生态环境保护措施显得尤为重要。

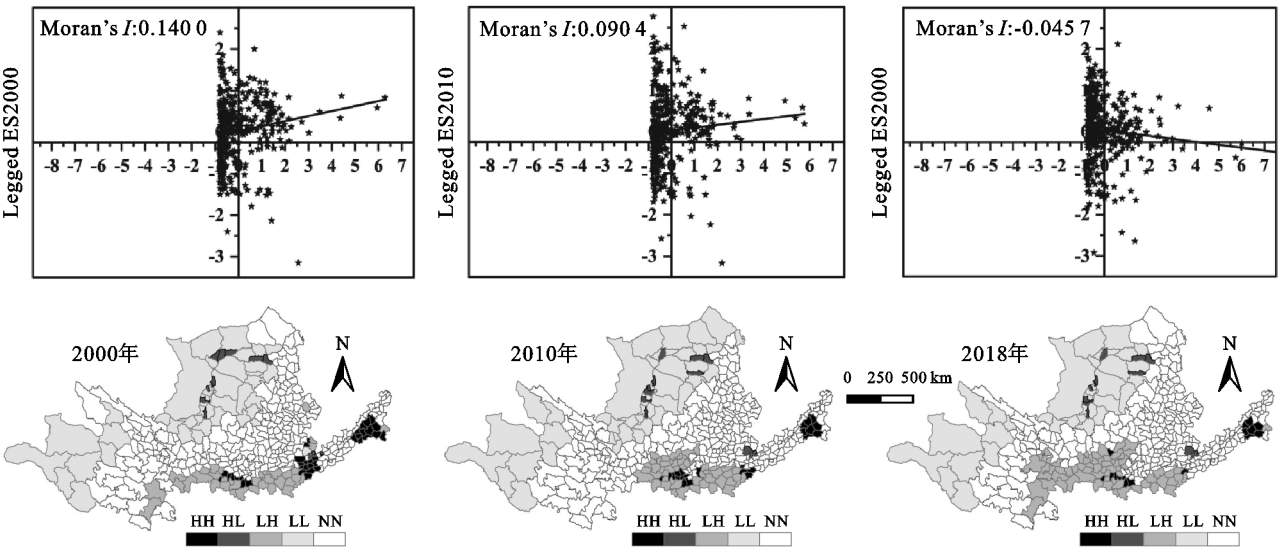


图 6 黄河流域城镇化与生态系统服务之间的全局 Moran's *I* 指数 ($P=1\%$) 和局部聚类 LISA 图 ($P=5\%$)

4 讨论

理清黄河流域城镇化与生态系统服务的时空关系有助于实现区域社会经济发展和生态保护的“双赢”目标。城镇化发展会改变生态系统结构,从而影响生态系统服务的供给。黄河流域的城镇化发展迅速,经济城镇化和土地城镇化速度均高于人口城镇化速度,符合城镇化的发展趋势^[30]。黄河流域的生态系统服务具有显著的空间异质性,在黄河上游、中游和下游地区差异较大,这也与 Zhang 等^[31]的研究成果一致。2000—2018 年黄河流域的综合生态系统服务有所增长,尤其在黄河中上游地区最为显著,这主要益于我国从 1978 年开始实施的“三北防护林工程”“退耕还林还草工程”等一系列的生态恢复工程,使得黄河中上游地区的生态环境得到了显著改善^[32]。

城镇化过程会改变生态系统结构,从而影响生态系统服务供给^[33]。城镇化要素的集聚特征也进一步加剧了生态系统服务的空间再分配^[34]。2000—2018 年黄河流域城镇化和生态系统服务的空间作用关系逐渐从正相关转变为负相关,这与 Tian 等^[35]的研究成果相似。主要是因为在城镇化发展的初期阶段,政府制定了一系列的生态恢复政策来实现区域的生态保护,这一阶段城镇化和生态系统服务均处于稳步增长阶段,2010 年以后,随着城镇化进程的加快,生态环境的压力骤增,加剧了城镇化对生态系统服务的负面效应。同时城镇化以资源的高消耗、生态系统服务的流失为代价的发展模式,以及资源的不合理开发和过度利用进一步加速了生态系统服务的衰减。尤其是大量的耕地、林地和草地被城市开发建设所占用,导致生态用地面积不断减少,生态空间受到挤压,最终影响了区域的生态服务供给^[36]。2000—2018 年黄

河流域城镇化与生态系统服务呈负相关且发展不协调的空间区域(HL 区和 LH 区)有所增长,而城镇化和生态系统服务 HH 区和 LL 区逐渐减少。城镇化和生态系统服务 HH 区的分布面积较少且零星分布在黄河中下游地区,这些地区的城镇化水平和生态系统服务供给水平较高。这也印证了 Pan 等^[37]的研究,在城镇化发展水平较高的地区生态系统服务的可达性更高,而且城市发展的可能性更大。未来可以根据城镇化和生态系统服务关系的区域特征进行分类施策以提高区域生态保护效率。可以将城镇化和生态系统服务的 HH 区作为黄河流域高质量发展的重点生态保护区,LL 区可以作为生态限制区,HL 区和 LH 区分别作为生态恢复区和生态控制区,同时重视对 HL 区和 LH 区的监管。此外,根据土地城镇化、人口城镇化和经济城镇化对黄河流域不同地区生态系统服务的影响机制,进一步结合流域的实际情况,采取有效措施控制城镇化发展对区域生态系统服务的过渡干扰,加强城市绿色基础设施的建设,通过针对性的策略来实现黄河流域城镇化和生态系统服务的可持续发展。

5 结论

- (1)2000—2018 年黄河流域的综合城镇化水平整体提升,其中经济城镇化实现了爆发性的增长,其次是土地城镇化和人口城镇化发展,变化率分别为 684.06%,57.36%,19.71%。
- (2)2000—2018 年黄河流域的粮食生产、固碳和土壤保持服务均呈增长趋势,而产水服务逐渐减少,变化率分别为 65.32%,59.47%,46.27%,−21.15%。整体来看,黄河上游地区土壤保持和产水服务明显增加,黄河中下游地区粮食生产和固碳服务显著增长而

产水服务明显降低。

(3)在时间尺度上,黄河流域人口、土地和经济城镇化对固碳服务和土壤保持服务的负向影响在不断加强,而对粮食生产和产水服务的正向影响不断减弱。在空间尺度上,城镇化对生态系统服务的负向影响逐渐增强,并且城镇化发展和生态系统服务不协调区域不断增加。

参考文献:

[1] 方创琳,崔学刚,梁龙武.城镇化与生态环境耦合圈理论及耦合器调控[J].地理学报,2019,74(12):2529-2546.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中国城市建设统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019.

[3] 初楠臣,张平宇,吴相利,等.俄罗斯东部城镇化与生态环境协调发展的时空演变特征[J].生态学报,2021,41(24):1-12.

[4] 赵忠旭,张燕杰,潘影,等.夜间灯光数据支持下西藏人类活动强度变化对生态系统调节服务的影响[J].地球信息科学学报,2020,22(7):1544-1554.

[5] 于德永,郝蕊芳.生态系统服务研究进展与展望[J].地球科学进展,2020,35(8):804-815.

[6] Costanza R, Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J].Nature,1997,387(15):253-260.

[7] Peng J, Tian L, Liu Y X, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds Identification [J]. Science of the Total Environment,2017,607:706-714.

[8] Fu Q, Hou Y, Wang B, et al. Scenario analysis of ecosystem service changes and interactions in a mountain-oasis-desert system: A case study in Altay Prefecture, China [J].Scientific Reports,2018,8(1):e12939.

[9] 邓楚雄,朱大美,李忠武,等.湘中丘陵区农业生态系统服务价值与城镇化水平弹性关系研究[J].中国生态农业学报,2021,29(8):1453-1466.

[10] 聂名萱,黄思华,濮励杰,等.快速城镇化地区生态系统服务的时空动态及权衡与协同分析:以苏锡常地区为例[J].长江流域资源与环境,2021,30(5):1088-1099.

[11] 陈万旭,刘志玲,李江风,等.长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究[J].生态学报,2020,40(15):5137-5150.

[12] 方露露,许德华,王伦澈,等.长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J].地理研究,2021,40(3):821-838.

[13] 刘晶晶,王静,戴建旺,等.黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异[J].自然资源学报,2021,36(1):148-161.

[14] 孙梦华,牛文浩,张蚌蚌,等.黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应:以陕甘宁地区

为例[J].应用生态学报,2021,32(11):3913-3922.

[15] 韩梦涛,涂建军,徐桂萍,等.黄河流域水域生态系统服务与经济发展时空协调性[J].中国沙漠,2021,41(4):167-176.

[16] 赵雪雁,杜昱璇,李花,等.黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J].自然资源学报,2021,36(1):131-147.

[17] 杨洁,谢保鹏,张德罡.黄河流域生态系统服务权衡协同关系时空异质性[J].中国沙漠,2021,41(6):78-87.

[18] 李贝歌,胡志强,苗长虹,等.黄河流域工业生态效率空间分异特征与影响因素[J].地理研究,2021,40(8):2156-2169.

[19] 李双成,马程,王阳,等.生态系统服务地理学[M].北京:科学出版社,2014.

[20] Budyko M I. Climate and life [M].San Diego: Academic Press, 1974.

[21] 张德锂,祁威,周才平.青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异[J].地理学报,2013,68(9):1197-1211.

[22] Fu B J, Liu Y, Lu, Y H. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J].Ecological Complexity, 2011,8(4):284-293.

[23] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall and its relationship to soil loss [J].Transaction American Geophysical Union,1958,39(2):285-291.

[24] Williams R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1990,329(1255):421-428.

[25] Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility [J].Soil Science Society of America Journal,1969,33(1):131-137.

[26] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation [J].Transactions of the ASAE,1987,30(5):1387-1396.

[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] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, et al. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS based Universal Soil Loss model [J].Agricultural Systems,2003,76(3):883-894.

[29] 周婷,陈万旭,李江风,等.神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J].生态学报,2021,41(15):6134-6145.

[30] 金丹,戴林琳.中国人口城镇化与土地城镇化协调发展的时空特征与驱动因素[J].中国土地科学,2021,35(6):74-84.

118-124.

[14] 周学雅,杨婷婷,王安志,等.科尔沁沙地沙丘一丘间低地降雨前后土壤水分分布特征[J].生态学杂志,2017,36(1):157-163.

[15] 何子森,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区野外坡面土壤水分变化对次降雨过程的响应[J].中国水土保持科学,2018,16(4):16-24.

[16] 马迎宾,黄雅茹,王淮亮,等.采煤塌陷裂缝对降雨后坡面土壤水分的影响[J].土壤学报,2014,51(3):497-504.

[17] 申明爽,朱清科,王瑜,等.陕北黄土区不同微地形土壤水分变化趋势分析[J].北京林业大学学报,2018,40(3):84-92.

[18] 司梦可,曹建生,阳辉.微地形变化对地表水文过程影响的研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(10):1587-1595.

[19] 李艳梅,王克勤,陈奇伯,等.金沙江干热河谷微地形改造对土壤水分运动参数的影响研究[J].水土保持研究,2008,15(4):19-23.

[20] Thompson S E, Katul G G, Porporato A. Role of microtopography in rainfall-runoff partitioning: An analysis using idealized geometry [J]. Water Resources Research,2010,46(7):1-11.

[21] 宿婷婷,韩丙芳,马红彬,等.水平沟整地措施对黄土丘陵区草原土壤水分动态平衡的影响[J].农业工程学报,2019,35(21):125-134.

[22] 冯天骄,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性[J].环境科学,2017,38(9):3860-3870.

[23] 安文明,韩晓阳,李宗善,等.黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化的影响[J].生态学报,2018,38(13):4852-4860.

[24] 黄艳丽,李占斌,苏辉,等.人工林对黄土高原小流域上下游不同坡面土壤水分的影响[J].农业工程学报,2018,34(15):108-116.

(上接第 93 页)

[31] Zhang Y S, Lu X, Liu B Y, et al. Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region: A case study in the Yellow River Basin [J]. Science of the Total Environment, 2020,766:e142480.

[32] 苏冰倩,王茵茵,上官周平.西北地区退耕还林工程对粮食生产与农民生计的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):247-252.

[33] 陈立恒,龚健,王雄,等.长江中游地区生态系统服务平衡与城镇化的空间关系[J].生态学报,2021,41(14):5546-5556.

[34] 欧阳晓,朱翔,贺清云.城市化与生态系统服务的空间交互关系研究:以长株潭城市群为例[J].生态学报,2019,39(20):7502-7513.

[35] Tian Y Y, Jiang G H, Zhou D Y, et al. Systematically addressing the heterogeneity in the response of ecosystem services to agricultural modernization, industrialization and urbanization in the Qinghai-Tibetan Plateau from 2000 to 2018 [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,285:e125323.

[36] 刘莹,耿文亮,邵静文,等.“三生空间”视角下土地利用变化与生态系统服务价值响应:以黄河下游地区为例[J].地域研究与开发,2021,40(4):129-135.

[37] Pan H Z, Page J, Cong C, et al. How ecosystems services drive urban growth: Integrating nature-based Solutions [J]. Anthropocene,2021,35(19):e100297.