

中国北方干燥地区城市扩展过程对生态系统服务的影响

——以呼和浩特-包头-鄂尔多斯城市群地区为例

孙泽祥^{1,3}，刘志锋^{1,2,*}，何春阳^{1,2}，邬建国^{1,2,4}

(1. 北京师范大学人与环境系统可持续研究中心, 北京 100875; 2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学资源学院, 北京 100875; 4. 美国亚利桑那州立大学生命科学院和全球可持续性研究所, 坦佩亚利桑那州 85287)

摘要: 理解中国北方干燥地区城市扩展过程对生态系统服务的影响对提高干燥地区人类福祉和实现区域可持续发展具有重要的意义。为此, 我们以正在经历快速城市化的呼和浩特-包头-鄂尔多斯(呼包鄂)地区为例, 从区域、城市和旗县 3 个尺度上揭示了该地区 1990~2013 年城市扩展过程对生态系统服务的影响。首先, 我们量化了呼包鄂地区 1990 年的生境质量、粮食生产、肉类生产和碳储量 4 种关键生态系统服务。然后, 我们分析了 1990~2013 年间呼包鄂地区的城市扩展过程。最后, 我们在区域、城市和旗县 3 个尺度上评价了呼包鄂地区 1990~2013 年城市扩展过程对生态系统服务的影响。我们发现, 1990~2013 年间, 呼包鄂地区经历了快速的城市扩展过程, 城市用地面积从 314.22 km² 增加到 692.10 km², 增长了 1.2 倍。区域城市扩展过程导致 4 种生态系统服务均明显下降。其中, 粮食生产服务损失最严重, 损失量达 1.36×10⁴t, 约占 1990 年全区粮食生产总量的 1%。边缘型和飞地型城市扩展对生态系统服务的影响最明显。1990~2013 年, 边缘型城市扩展导致的粮食生产、肉类生产和碳储量损失量占区域城市扩展过程中各项服务损失总量的比例均超过 60%, 飞地型城市扩展造成的肉类生产服务损失量大于区域城市扩展过程中该服务损失总量的 1/3。边缘型和飞地型城市扩展过程导致的耕地和草地大量减少是造成生态系统服务快速下降的主要原因。因此, 我们建议在呼包鄂地区的城市化进程中应提高城市用地利用率, 控制边缘型和飞地型城市扩展, 以减少城市扩展过程对生态系统服务的影响。

关键词: 生态系统服务; 城市扩展过程; 中国北方干燥地区; 呼包鄂地区; 城市扩展模式; 多尺度分析

中图分类号: **文献标识码:** **文章编号:**

干燥地区是指以水资源短缺为主要特征, 生产力和养分循环均受到供水量限制的区域, 即年均降水量与年均潜在蒸散量之比小于 0.65 的地区^[1-2]。全球干燥地区主要分布在亚洲中西部、欧洲东部、非洲北部、北美洲西部和大洋洲, 面积约为 6095 万 km², 占全球陆地总面积的 41%^[2-3]。中国北方干燥地区主要分布在中国的西北、东北和华北, 面积约为 395 万平方千米, 占中国陆地总面积的 41%^[2, 4-5]。中国北方干燥地区因生态环境脆弱、生态系统服务供需矛盾突出、贫困人口集中、城市化迅速以及对气候变化敏感,

收稿日期:; 修订日期:。

基金项目: 国家自然科学基金委青年科学基金项目(41501195); 国家重大科学研究计划项目(2014CB954302, 2014CB954303)。**[Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No. 41501195; National Basic Research Program of China, No. 2014CB954302& 2014CB954303]

第一作者简介: 孙泽祥(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事城市化及其对生态系统服务影响研究。E-mail: kindsnake@126.com

***通讯作者简介:** 刘志锋(1986-), 男, 讲师, 研究方向为景观可持续科学、景观生态学及生态系统服务等。E-mail: Zhifeng.Liu@bnu.edu.cn

已成为中国当前国土空间开发和生态文明建设的重点关注区域。

改革开放以来,中国北方干燥地区经历了快速的城市化,导致该区域生态系统服务发生了明显变化。1990~2010年,中国北方干燥地区城市人口从1.1亿增加到1.8亿,增加了63.6%^[6-7]。1990~2005年,该区域城市土地面积从0.81万km²增加到1.36万km²,增加了68.57%^[8]。2005~2030年,该区域城市土地面积的增长率可能将超过25%^[9]。在城市化的影响下,中国北方干燥地区半干旱草原的植被净初级生产力从1989年的341.3 TgC减少到2000年的305.5 TgC,减少了10.5%^[10]。区域1990~2010年城市扩展过程导致农田潜在生产力的损失量超过1亿吨^[11-12]。中国北方干燥地区生态系统服务的明显变化导致区域生态系统服务的供需矛盾进一步加剧,对区域人类福祉和可持续性造成了严重影响^[4-5, 10-13]。因此,揭示中国北方干燥地区快速城市化进程中生态系统服务变化时空格局对于协调区域生态系统服务供需关系、维持和提高区域人类福祉及可持续性具有重要的意义。

然而,已有研究大都关注于中国北方干燥地区退耕还林还草等生态修复工程对生态系统服务的影响。比如,Fu等^[14]分析了位于中国北方干燥地的黄土高原地区2000~2008年退耕还林对土壤保持服务的影响。Jia等^[15]评价了位于中国北方干燥地的陕西省北部地区2000~2008年退耕还林还草对该地区净初级生产力、产水量以及土壤保持等生态系统服务的影响。目前,关于中国北方干燥地区快速城市扩展过程对生态系统服务影响的研究仍然较少。

本文的研究目标是以中国北方干燥地区中正在经历快速城市化的呼包鄂城市群地区为例,揭示该地区1990~2013年城市扩展过程对生态系统服务的影响。为此,我们首先量化了呼包鄂地区4种关键生态系统服务。然后,我们对呼包鄂地区1990~2013年城市扩展过程的时空动态进行了分析。最后,我们评价了呼包鄂地区1990~2013年城市扩展过程对该地区生态系统服务的影响。

1 研究区和数据

1.1 研究区

呼包鄂地区位于中国北方干燥地中部,地处37° 37' N~42° 34' N、106° 28' E~112° 18' E之间,包含呼和浩特、包头和鄂尔多斯等3个地级市,总面积为13.16万km²(图1)。该地区地势从西北向东南微倾,平均海拔约1300m,地貌类型主要包括山地、平原和沙地^[4, 16]。呼包鄂地区气候类型属于温带大陆性季风气候,多年平均降水量约为300mm,多年平均气温约为8°C^[4, 16]。

呼包鄂地区正在经历快速的城市化。1990~2013年,区域城镇人口从237.5万增长到571.7万,增长了1.4倍,城镇人口占总人口的比例从48.3%增长到73.4%,增长了25.1个百分点^[17-18]。区域生产总值(Gross Domestic Product, GDP)从90.6亿元增长到2492.6亿元(按1990年不变价格计算),增长了27.5倍^[17-18]。其中,第二产业占GDP的比重从47.2%增长到48.5%,增长了1.3个百分点;第三产业占GDP的比重从33.7%增长到48.2%,增长了14.5个百分点^[17-18]。

1.2 数据

本研究使用的1990、2000和2013年土地利用/覆盖数据来源于中国土地利用/覆盖数据集(China's Land-Use/cover Datasets, CLUDs)^[20-21]。该数据集是以Landsat TM/ETM+和HJ-1/1B等影像为基础建立起来的,其分类系统包含6大类共25个子类,空间分辨率为30m,总体分类精度在90%以上^[20-23]。

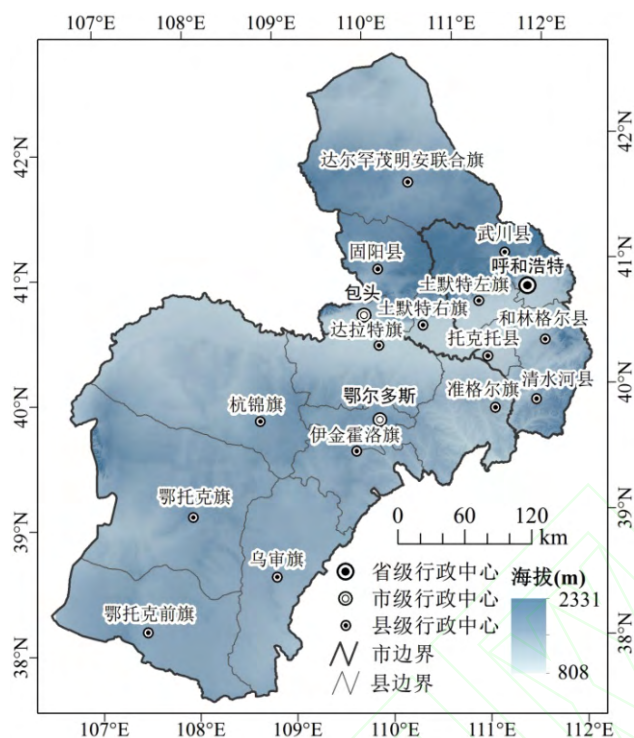


图 1 研究区

Fig. 1 Study area

气象站点数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.nmic.cn/home.do>), 包括研究区及其周边 200 km 范围内 42 个气象站点记录的 1990 年的气温和降水等。参考 Perry 和 Hollis^[24]的研究, 采用反距离权重 (Inverse Distance Weighting, IDW) 法对气象数据进行插值, 以便于计算研究区的生态系统服务。

归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 采用了 1990 年的 Pathfinder AVHRR NDVI 数据。该数据来源于寒区旱区科学数据中心

(<http://westdc.westgis.ac.cn/>), 其空间分辨率为 8km, 时间分辨率为 10 天^[25]。参考 Holben^[26]的研究, 采用最大值合成法对 NDVI 数据进行逐月最大值合成处理, 以消除云的影响。

社会经济统计数据来源于《内蒙古统计年鉴》, 包括呼包鄂地区各县级行政单元在 1990 年的粮食总产量、羊肉总产量以及牛肉总产量。基础地理信息数据来源于国家基础地理信息中心 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn>), 包括呼包鄂地区的行政边界、行政中心、道路和河流等。

为了便于进行计算和叠加分析, 我们通过栅格化、投影变化和重采样等操作, 将所有数据的空间分辨率统一为 180 m。

2 方法

本研究共包含 3 个主要步骤。首先, 我们在千年生态系统评估 (Millennium Ecosystem Assessment, MEA) ^[1] 提出的生态系统服务概念框架下, 量化了区域 1990 年生境质量、粮食生产、肉类生产和碳储量 4 项生态系统服务。然后, 我们分析了呼包鄂地区 1990~2013 年城市扩展过程。最后, 我们评价了呼包鄂地区 1990~2013 年城市扩展过程对生态系统服务的影响。

2.1 量化生态系统服务

2.1.1 生境质量

参考 Tallis 等^[27]的研究,我们采用 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型中的生境质量模块对呼包鄂地区的生境质量进行计算。土地利用/覆盖类型 j 中第 x 个像元上的生境质量可以用下式表示^[27]。

$$Q_{xy} = H_j \left(1 - \frac{D_{xy}^z}{D_{xy}^z - k^z} \right) \quad (1)$$

式中, Q_{xy} 为土地利用/覆盖类型 j 中像元 x 上的生境质量; H_j 为土地利用/覆盖类型 j 上的生境适宜性; D_{xy} 为土地利用/覆盖类型 j 中像元 x 上所受的胁迫水平; k 为半饱和常数; z 为归一化常量。

参考 Tallis 等^[27]及包玉斌等^[28]的研究,我们获取了计算生境质量所须的胁迫因子权重、胁迫因子影响距离、不同生境的适宜性及其对胁迫因子的敏感性等参数。

2.1.2 粮食生产和肉类生产

参考 Ju 等^[29]的研究,我们将从《内蒙古统计年鉴》中获得的研究区 1990 年各县级行政单元内的粮食总产量分配到了每个耕地像元上,将从该年鉴中获得的研究区 1990 年各县级行政单元上的肉类总产量分配到每个草地象元上。具体计算方法如下。

$$Y_{ij} = H_i \times ANPP_{ij} \times \alpha \quad (2)$$

式中, Y_{ij} 表示第 i 个行政区内第 j 个耕地/草地像元上的粮食/肉类总产量,单位为 t; $ANPP_{ij}$ 为第 i 个行政单元内第 j 个耕地/草地像元上的地上净初级生产力 (Aboveground Net Primary Productivity, ANPP), 参考 Buyantuyev 和 Wu^[30]的研究进行计算; α 是将碳含量转为干物质量的系数,取值为 2.22; H_i 为第 i 个行政单元内的粮食/肉类产量转换系数,采用下式计算^[29]。

$$H_i = \frac{Y_i}{ANPP_i \times \alpha} \quad (3)$$

其中, Y_i 为第 i 个行政单元内的粮食/肉类总产量; $ANPP_i$ 为第 i 个行政单元内耕地/草地上的 ANPP 总和。

2.1.3 碳储量

参考 Tallis 等^[27]的研究,采用 InVEST 模型中的碳储量与碳固持模块来计算研究区的碳储量。其计算公式如下。

$$CS_{i,j} = A_{i,j} \times (AC_i + BC_i + SC_i + DC_i) \quad (4)$$

式中, $CS_{i,j}$ 表示第 i 种土地利用/覆盖类型中第 j 个像元上的碳储量,单位为 MgC, $A_{i,j}$ 表示第 i 类土地利用/覆盖类型中第 j 个像元的面积,单位为 hm^2 ; AC_i 表示第 i 种土地利用/覆盖类型的地上碳密度, BC_i 表示第 i 种土地利用/覆盖类型的地下碳密度, SC_i 表示第 i 种土地利用/覆盖类型的土壤有机碳密度, DC_i 表示第 i 种土地利用/覆盖类型的死亡有机碳密度,单位均为 MgC/hm^2 。综合参考 Fang 等^[31-32]、程积民等^[33]以及张靖等^[34]的研究,最终确定了本研究所需的碳密度数据。基于上述方法,我们获取了 1990 年呼包鄂地区空间分辨率为 180 m 的生境质量、粮食生产、肉类生产和碳储量 4 种生态系统服务的信息。

2.2 分析城市扩展过程

参考 Xu 等^[35]和谢文瑄等^[36]的研究,我们从区域、城市和旗县 3 个尺度上对

1990~2013 年呼包鄂地区城市扩展的时空动态特征进行了分析。首先，我们通过对比呼包鄂地区 1990、2000 和 2013 年不同尺度上城市用地的数量分析了城市扩展的数量和格局特征。其次，我们采用刘小平等^[37]和 Liu 等^[38]提出的景观扩展指数（Landscape Expansion Index, LEI）分析了呼包鄂地区 1990~2013 年不同尺度上的城市扩展模式。景观扩展指数的计算方法可以用下式表示^[37-38]。

$$LEI = \frac{A_0}{A_0 + A_v} \times 100 \quad (5)$$

式中， LEI 为新增城市用地的景观扩展指数，无量纲； A_0 为新增城市用地斑块的缓冲区与已有城市用地斑块的交集； A_v 为新增城市用地斑块缓冲区与非城市用地的交集。当 LEI 为 0 时，表明新增城市用地斑块为飞地型，即新增城市斑块与原有城市斑块间处于分离状态；当 $0 < LEI \leq 50$ 时，表明新增城市用地斑块为边缘型，即新增城市斑块沿原有城市斑块的边缘扩展；当 $50 < LEI \leq 100$ 时，表明新增城市用地斑块为内填型，即新增城市斑块填充于原有城市斑块内部^[37-38]。

2.3 评价城市扩展过程对生态系统服务影响

参考 He 等^[39]以及胡和兵等^[40]的研究，我们从区域、城市和旗县 3 个尺度上来分析呼包鄂地区 1990~2013 年城市扩展过程对城市扩展区域中 4 种生态系统服务的影响。城市扩展过程对生态系统服务的影响可以采用下式表示。

$$\Delta ES_i = ES_{i,m} - ES_{i,n} \quad (6)$$

式中， ΔES_i 表示由城市扩展过程所导致的第 i 种生态系统服务的损失量； $ES_{i,m}$ 表示城市扩展区域中第 i 种生态系统服务在第 m 年的值； $ES_{i,n}$ 表示城市扩展区中第 i 种生态系统服务在第 n 年的值。参考 He 等^[39]的研究，我们假设城市用地中 4 项生态系统服务的值近似为 0。

3 结果

3.1 1990 年呼包鄂地区生态系统服务的空间格局

1990 年，呼包鄂地区生态系统服务在区域间存在明显差异（图 2）。区域平均生境质量为 0.53，总碳储量为 573.45 TgC，这两种服务较高的地区主要分布在呼和浩特市北部和包头市南部。区域粮食生产总量为 $137.33 \times 10^4 t$ ，该服务较高的地区主要位于呼和浩特市中部、包头市东南部和鄂尔多斯市北部。区域肉类生产总量为 $2.86 \times 10^4 t$ ，该服务在鄂尔多斯市北部和包头市东南部地区较高。

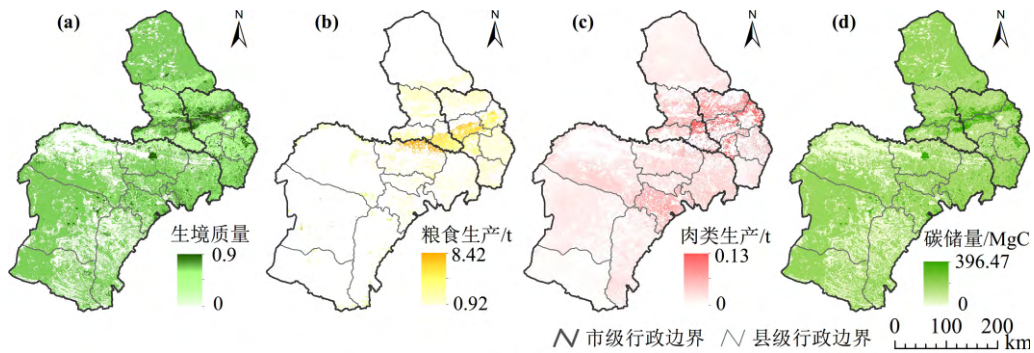


图 2 呼包鄂地区 1990 年 4 种生态系统服务空间格局

Fig. 2 Spatial patterns of the four ecosystem services in Hohhot-Baotou-Ordos region in 1990

(a) 生境质量；(b) 粮食生产；(c) 肉类生产；(d) 碳储量

3.2 1990~2013 年呼包鄂地区城市扩展过程

1990~2013 年呼包鄂地区经历了快速的城市扩展过程（图 3、图 4a）。区域城市用地面积从 1990 年的 314.22 km² 增加到 2013 年的 692.10 km²，增长了 1.20 倍，年均增长率为 3.49%。同时，区域城市扩展速度呈加快趋势（图 3、图 4a）。1990~2000 年城市用地面积从 314.22 增长到 364.27 km²，年均增长 1.49%；2000-2013 年，城市用地面积从 364.27 km² 增长到 692.10 km²，年均增长 5.06%。区域城市扩展模式以边缘型为主（图 4b）。在呼包鄂地区 1990~2013 年城市扩展区域中，边缘型城市扩展面积为 245.01 km²，占区域城市扩展总面积的 64.84%。

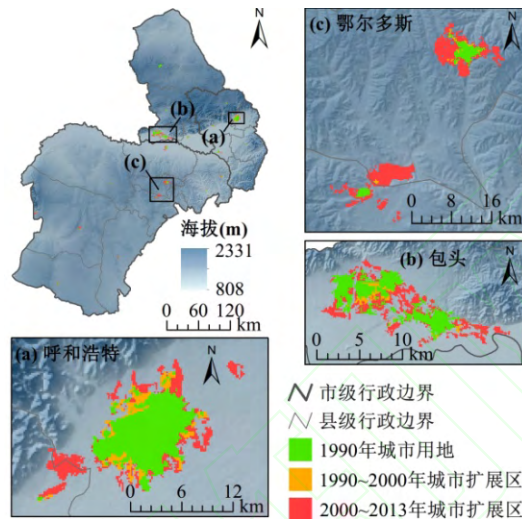


图 3 1990-2013 年呼包鄂地区城市扩展空间格局

Fig. 3 Spatial patterns of urban expansion in Hohhot-Baotou-Ordos region during 1990-2013

1990~2013 年，鄂尔多斯市、包头市和呼和浩特市城市用地面积均明显增加（图 3、图 4a）。鄂尔多斯市城市用地面积增长最快，从 57.93 km² 增加到 238.08 km²，增长了 3.11 倍。三个城市的城市扩展模式均以边缘型为主（图 4b）。其中，包头市边缘型城市扩展最明显，其扩展面积为 89.29 km²，占包头市城市扩展总面积的 71.34%。

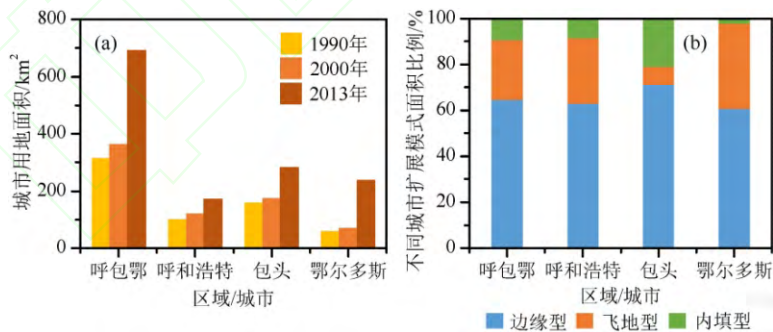


图 4 1990-2013 年呼包鄂地区城市扩展过程和扩展模式

Fig. 4 Urban expansion processes and modes in Hohhot-Baotou-Ordos region during 1990-2013

(a) 呼包鄂地区 1990-2013 年城市用地面积变化；(b) 呼包鄂地区 3 种不同扩展模式城市用地面积比例

1990~2013 年，呼包鄂地区各旗县城市用地面积均呈增长趋势（图 4）。在所有 18 个旗县中，鄂尔多斯市鄂托克旗城市用地增长速度最快，城市用地面积从 4.08 km² 增加到了 37.10 km²，增长了 8.09 倍。杭锦旗、鄂托克前旗以及武川县等 13 个旗县的城市扩展模式均以边缘型为主，占呼包鄂地区县级行政单元总数的 72.22%。在这些城市中，杭锦旗的边缘型城市扩展区面积比例最高，占该旗城市用地扩展总面积的 99.07%。

3.3 呼包鄂地区 1990~2013 年城市扩展过程对生态系统服务的影响

呼包鄂地区 1990~2013 年城市扩展过程导致生态系统服务明显下降（图 5、表 1）。在 4 种服务中，城市扩展对粮食生产服务的影响最大，导致城市扩展区粮食生产下降了 13581.41 t，占 1990 年区域粮食生产总量的 0.99%。区域城市扩展过程导致碳储量和肉类生产服务损失了 0.2%~0.3%（图 5、表 1）。1990~2013 年，城市扩展区碳储量下降了 1.65 TgC，占 1990 年区域总碳储量的 0.29%。肉类生产服务下降了 70.19 t，占 1990 年区域肉类生产总量的 0.25%。同时，城市扩展区域平均生境质量下降了 0.47，约为全区平均水平的 88.68%。

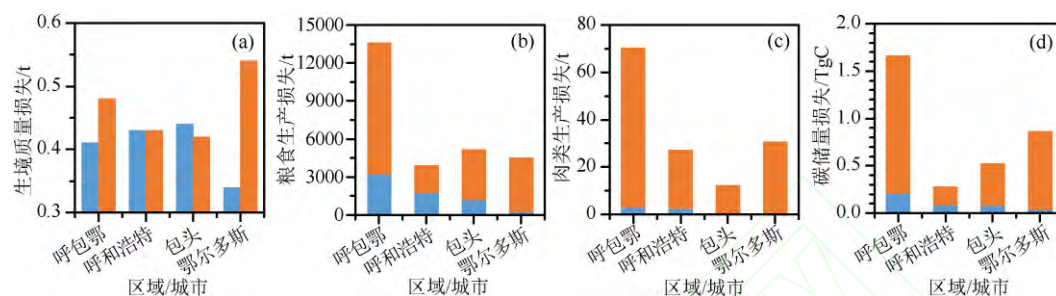


图 5 呼包鄂地区 1990-2013 年城市扩展过程导致的生态系统服务损失量

Fig. 5 Losses of ecosystem services caused by urban expansion in Hohhot-Baotou-Ordos region during 1990-2013

(a) 生境质量损失; (b) 粮食生产损失; (c) 肉类生产损失; (d) 碳储量损失

区域 2000-2013 年城市扩展过程对生态系统服务的影响明显大于 1990~2000 年城市扩展过程对生态系统服务的影响（图 5、表 1）。1990~2000 年城市扩展区中粮食生产损失了 3237.24 t，占 1990 年粮食生产总量的 0.24%；2000~2013 年粮食生产损失了 10344.17 t，占 1990 年该服务总量的 0.75%。1990~2000 年和 2000~2013 年城市扩展过程分别导致碳储量损失了 0.21 TgC 和 1.44TgC，分别占 1990 年该服务总量的 0.04%和 0.25%。1990~2000 年和 2000~2013 年城市扩展过程分别导致肉类生产服务下降 3.02 t 和 67.17 t，分别占 1990 年该服务总量的 0.01%和 0.24%。1990~2000 年，城市扩展区域平均生境质量下降了 0.41，约为全区平均水平的 77.36%；2000~2013 年，城市扩展区域平均生境质量下降了 0.48，约为全区平均水平的 90.57%。

表 1 1990-2013 年呼包鄂地区城市扩展过程导致的生态系统服务损失量

Table 1 Losses of ecosystem services caused by urban expansion in Hohhot-Baotou-Ordos region during 1990 - 2013

生态系统服务	1990~2000 年		2000~2013 年		1990~2013 年	
	损失量	比例/%	损失量	比例/%	损失量	比例/%
生境质量*	0.41	77.36	0.48	90.57	0.47	88.68
粮食生产/t**	3237.24	0.24	10344.17	0.75	13581.41	0.99
肉类生产/t**	3.02	0.01	67.17	0.24	70.19	0.25
碳储量/TgC**	0.21	0.04	1.44	0.25	1.65	0.29

* “比例”表示城市扩展区平均生境质量变化量与全区 1990 年平均生境质量之比。

** “比例”表示城市扩展区生态系统服务损失量与全区 1990 年生态系统服务总量的比值。

包头市粮食生产服务损失最严重（图 5、表 2）。1990~2013 年，包头市城市扩展区粮食生产服务下降了 5160.16 t，占呼包鄂城市扩展区粮食生产服务损失总量的 37.99%。鄂尔多斯市生境质量、肉类生产和碳储量损失最严重（图 5、表 2）。1990~2013 年，该市城市扩展区中平均生境质量下降了 0.53，是呼包鄂城市扩展区域平均生境质量损失量的 1.13 倍。肉类生产服务下降了 30.69 t，占呼包鄂城市扩展区中肉类生产服务损失总量的 43.72%。碳储量下降了 0.86 TgC，占呼包鄂城市扩展区域碳储量损失总量的 52.12%。

城市扩展过程对生态系统服务的影响在不同旗县间存在明显差异（表 2）。呼和浩特市辖区的城市扩展区域内肉类生产服务损失最为明显（表 2）。该城市扩展区内肉类生产服务损失了 14.58 t，占呼包鄂城市扩展区肉类生产损失总量的 20.77%。包头市辖区的

城市扩展区域内粮食生产和碳储量损失最严重(表 2)。该城市扩展区中粮食生产和碳储量服务分别损失了 4714.43 t 和 0.47 TgC, 分别占呼包鄂城市扩展区域粮食生产和碳储量损失总量的 34.71%和 28.48%。达尔罕茂明安联合旗城市扩展区的生境质量损失最严重(表 2)。该旗城市扩展过程导致其城市扩展区内生境质量下降了 0.64, 是呼包鄂城市扩展区平均生境质量损失量的 1.36 倍。

表 2 1990-2013 年呼包鄂地区各市县城市扩展过程导致的生态系统服务损失量
Table 2 Losses of ecosystem services caused by urban expansion in all cities and counties in Hohhot-Baotou-Ordos region during 1990 - 2013

尺度	生境质量		粮食生产		肉类生产		碳储量	
	损失量	比例* /%	损失量 /t	比例** /%	损失量 /t	比例** /%	损失量 /TgC	比例** /%
呼和浩特市	0.43	76.12	3921.80	0.72	27.21	0.55	0.27	0.29
呼和浩特市辖区	0.46	82.58	3239.64	3.81	14.58	1.78	0.17	1.52
土默特左旗	0.50	88.37	421.20	0.24	12.29	1.34	0.06	0.38
托克托县	0.11	23.59	134.97	0.20	0.00	0.00	0.01	0.16
和林格尔县	0.28	53.08	40.67	0.05	0.00	0.00	0.01	0.06
清水河县	0.54	86.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06
武川县	0.44	76.77	85.32	0.10	0.35	0.02	0.01	0.04
包头市	0.42	71.58	5160.16	1.45	12.28	0.18	0.52	0.37
包头市辖区	0.41	75.16	4714.43	9.60	11.49	2.25	0.47	4.21
土默特右旗	0.46	91.18	423.36	0.27	0.00	0.00	0.02	0.18
固阳县	0.61	112.40	22.38	0.02	0.37	0.03	0.02	0.08
达尔罕茂明安联合旗	0.64	102.71	0.00	0.00	0.42	0.01	0.01	0.01
鄂尔多斯市	0.53	103.25	4499.45	0.95	30.69	0.18	0.86	0.25
鄂尔多斯市辖区	0.54	91.07	1264.13	8.08	11.89	2.10	0.36	2.97
达拉特旗	0.49	99.38	745.24	0.31	2.09	0.12	0.11	0.35
准格尔旗	0.54	93.52	248.92	0.38	2.53	0.13	0.08	0.21
鄂托克前旗	0.52	100.07	16.77	0.13	0.92	0.07	0.04	0.08
鄂托克旗	0.48	84.46	1663.64	9.80	3.48	0.09	0.14	0.16
杭锦旗	0.61	141.53	0.00	0.00	1.14	0.03	0.02	0.03
乌审旗	0.47	107.97	310.61	1.09	1.70	0.09	0.04	0.11
伊金霍洛旗	0.62	107.47	250.13	0.88	6.94	0.32	0.09	0.35

*市/旗县的城市扩展区平均生境质量变化量与地市/旗县 1990 年平均生境质量之比。

**市/旗县中城市扩展区生态系统服务损失量与地市/旗县 1990 年生态系统服务总量的比值。

4 讨论

4.1 城市扩展过程与社会经济发展的关系

参考黄庆旭等^[41]的研究, 我们从人口、经济、固定资产投资以及居民生活水平等 4 个方面选取了总人口、城市人口、GDP、全社会固定资产投资以及职工平均工资等 5 个具体指标, 在旗县尺度上利用相关分析揭示了呼包鄂地区 1990~2013 年城市扩展过程与社会经济发展之间的关系。我们发现, 呼包鄂地区 1990~2013 年城市用地面积增长量与总人口增长量、城市人口增长量、GDP 增长量以及全社会固定资产投资增长量之间呈显著的正相关关系, 相关系数均在 0.8 以上, 均通过了 0.001 水平的显著性检验。其中, 城市用地面积增长量与全社会固定资产投资增长量之间的相关关系最显著, 其相关系数为 0.91。

4.2 城市扩展过程导致生态系统服务损失的主要原因

呼包鄂地区 1990~2013 年城市扩展过程中, 耕地和草地的大量损失是造成生态系统服务下降的主要原因。1990~2013 年, 区域城市扩展过程导致耕地损失 148.39 km², 占城市用地扩展总面积的 39.27%; 导致草地损失 132.32 km², 占城市扩展总面积的 35.02%。在城市尺度上, 包头市城市扩展过程中耕地损失量最大, 为 61.79 km², 占区域耕地损失总量的 41.64%。鄂尔多斯市草地损失量最大, 为 80.77 km², 占区域草地损失总量的 61.04%。在旗县尺度上, 包头市市辖区城市扩展过程中耕地损失量最大, 为 58.48 km²,

占区域耕地损失总量的 39.41%。鄂尔多斯市市辖区草地损失量最大，为 31.59 km²，占区域草地损失总量的 23.87%。

呼包鄂地区 1990~2013 年城市扩展通过占用耕地导致粮食生产和碳储量服务分别损失了 13581.41 t 和 0.57 TgC，分别占城市扩展区相应服务损失总量的 100%和 34.55%。城市用地通过占用草地导致肉类生产和碳储量服务分别损失了 70.19 t 和 0.76 TgC，分别占城市扩展区相应服务损失总量的 100%和 46.06%。

4.3 不同城市扩展模式对生态系统服务影响的差异及其原因

呼包鄂地区 1990~2013 年城市扩展过程中，3 种城市扩展模式对粮食生产、肉类生产和碳储量的影响具有明显差异。区域边缘型城市扩展导致的 3 种服务损失量均明显大于其它城市扩展模式造成的损失量（图 6、表 3）。1990~2013 年，区域边缘型城市扩展导致碳储量、肉类生产和粮食生产服务的损失量占城市扩展过程中各项服务损失总量的比例均在 60%以上（图 6、表 3）。其中，碳储量损失了 1.08 TgC，占城市扩展区域碳储量损失总量的 65.45%；肉类生产服务损失了 43.35 t，占城市扩展区肉类生产服务损失总量的 61.76%；粮食生产服务损失了 8221.00 t，占城市扩展区粮食生产服务损失总量的 60.53%。

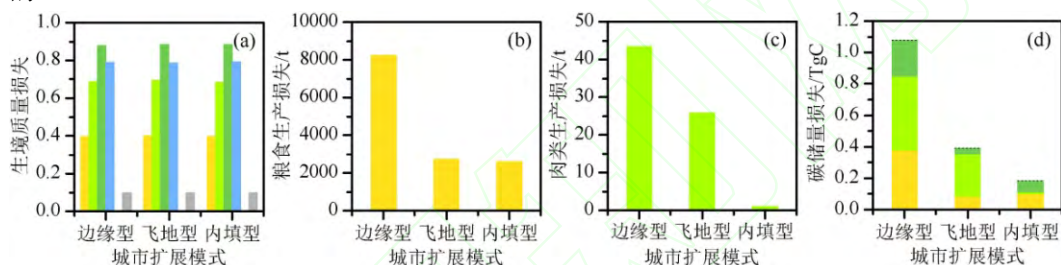


图 6 不同城市扩展模式通过占用不同地类造成的生态系统服务损失量

Fig. 6 Losses of ecosystem services caused by conversion from various land use/cover types to urban land under different urban expansion modes

(a) 生境质量损失；(b) 粮食生产损失；(c) 肉类生产损失；(d) 碳储量损失。

飞地型城市扩展对肉类生产服务的影响相对较大（图 6、表 3）。1990~2013 年，区域飞地型城市扩展导致肉类生产服务减少了 25.78 t，占城市扩展过程中肉类生产服务损失总量的 36.73%。区域飞地型城市扩展导致的粮食生产和碳储量损失量占区域城市扩展过程中 2 项服务损失总量的比例在 20%~24%之间（图 6、表 3）。

表 3 不同城市扩展模式导致的生态系统服务损失量

Table 3 Losses of ecosystem services caused by different urban expansion modes

生态系统服务	边缘型		飞地型		内填型	
	损失量	比例/%	损失量	比例/%	损失量	比例/%
生境质量*	0.473	100.00	0.465	98.31	0.495	104.65
粮食生产/t**	8 221.00	60.53	2 751.89	20.26	2 608.51	19.21
肉类生产/t**	43.35	61.76	25.78	36.73	1.06	1.51
碳储量/TgC**	1.08	65.45	0.39	23.64	0.18	10.91

* “比例”表示某种城市扩展模式下城市扩展区平均生境质量变化量与区域所有城市扩展区平均生境质量变化量的比值。

** “比例”表示某种城市扩展模式下生态系统服务损失量与区域所有城市扩展区生态系统服务损失总量的比值。

内填型城市扩展对 3 种生态系统服务的影响最小，造成的各项生态系统服务损失量均不及城市扩展过程中生态系统服务损失总量的 20%（图 6、表 3）。1990~2013 年，区域内填型城市扩展导致粮食生产服务下降了 2608.51 t，占区域城市扩展过程中粮食生产损失总量的 19.21%。同时，该类型城市扩展导致碳储量损失了 0.18TgC 占城市扩展过程中碳储量损失总量的 10.91%。此外，区域内填型城市扩展导致肉类生产服务损失了 1.06 t，仅占城市扩展区肉类生产服务损失总量的 1.51%。

边缘型城市扩展过程中，城市用地占用大量耕地和草地是导致生态系统服务明显下

降的主要原因（图 6、表 3、表 4）。1990~2013 年，呼包鄂地区边缘型城市扩展导致耕地和草地分别损失了 99.63 km² 和 82.59 km²，分别占城市扩展区内耕地和草地各自损失总量的 67.14% 和 62.41%（表 4）。在这一过程中，城市扩展过程通过占用耕地导致粮食生产和碳储量服务分别损失了 8221.00 t 和 0.38TgC，分别占边缘型城市扩展区相应服务损失总量的 100% 和 35.21%（图 6、表 3）。城市扩展过程通过占用草地导致肉类生产和碳储量服务分别损失了 43.35 t 和 0.47 TgC，分别占边缘型城市扩展区相应服务损失总量的 100% 和 43.71%（图 6、表 3）。

表 4 不同城市扩展模式导致的各地类损失量

土地利用类型	损失的总面积 /km ²	边缘型		飞地型		内填型	
		面积/km ²	比例/% [*]	面积/km ²	比例/% [*]	面积/km ²	比例/% [*]
耕地	148.40	99.63	67.14	22.45	15.13	26.32	17.74
草地	132.33	82.59	62.41	47.18	35.65	2.56	1.93
农村居民点	46.16	29.84	64.64	16.26	35.23	0.06	0.13
林地	26.92	18.53	68.83	2.82	10.48	5.57	20.69
未利用地	20.86	12.02	57.62	8.26	39.60	0.58	2.78
水体	3.21	2.40	74.77	0.26	8.10	0.55	17.13

^{*}占城市扩展区相应地类损失总面积的比例。

飞地型城市扩展过程中，城市用地占用草地是导致肉类生产服务损失量相对较大的主要原因（图 6、表 3、表 4）。1990~2013 年，呼包鄂地区飞地型城市扩展导致草地损失了 47.18 km²，占城市扩展过程中草地损失总量的 35.65%。在该过程中，城市用地通过占用草地导致肉类生产服务损失了 25.78 t，占飞地型城市扩展导致肉类生产服务损失总量的 100%。

2014 年 3 月，中国政府开始实施以人为本，以城乡统筹、节约集约、和谐发展为基础特征的“新型城镇化”规划，并明确将呼包鄂地区列为重点发展的中西部城市群之一。这意味着该地区未来城市化水平还将进一步提高。因此，我们认为在呼包鄂地区未来的快速城市化进程中，应提高城市土地利用效率，控制边缘型和飞地型城市扩展，减少对耕地和草地的占用，以减缓城市扩展过程对生态系统服务的影响，提高人类福祉和区域可持续性。

4.4 展望

本研究仍然存在一些不足。首先，粮食生产和肉类生产服务的数据均来源于 1990 年统计年鉴，我们未考虑这两种服务在 1990~2013 年间的变化。其次，受数据可获取性的限制，我们仅量化了支持服务、供给服务和调节服务，未考虑文化服务。

在未来的研究中，我们将结合研究区逐年城市扩展信息以及多年气象数据和统计资料，更加准确地评估城市扩展过程对生态系统服务的影响。同时，还将基于实地问卷调查和大数据分析来量化区域的文化服务，评价城市扩展过程对文化服务的影响^[42]。此外，我们将耦合生态系统服务模型与城市扩展模型模拟区域未来城市扩展过程对生态系统服务的潜在影响。

5 结论

1990~2013 年呼包鄂地区经历了快速的城市扩展过程。区域城市用地面积从 314.22 km² 增加到 692.10 km²，增加了 1.20 倍。鄂尔多斯市城市扩展速度最快，其城市用地面积从 57.93 km² 增加到了 238.08 km²，增长了 3.11 倍。

区域快速的城市扩展过程导致生境质量、粮食生产、肉类生产和碳储量 4 种生态系

统服务均明显下降。在区域尺度上, 粮食生产服务下降最明显, 损失了 13581.41 t, 占呼包鄂地区 1990 年粮食生产总量的 0.99%。在城市尺度上, 包头市城市扩展对粮食生产服务的影响最大, 鄂尔多斯市城市扩展对生境质量、肉类生产和碳储量的影响最大。

区域边缘型和飞地型城市扩展过程造成的生态系统服务损失最为明显。呼包鄂地区 1990~2013 年边缘型城市扩展导致粮食生产、肉类生产和碳储量的损失量均占区域城市扩展过程中相应生态系统服务损失总量的 60%以上, 飞地型城市扩展导致的肉类生产服务损失量超过区域城市扩展过程中相应生态系统服务损失总量的 1/3。在边缘型和飞地型城市扩展过程中, 耕地和草地的大量损失是造成生态系统服务下降的主要原因。因此, 在呼包鄂地区的城市化进程中, 应提高城市用地利用效率, 控制边缘型和飞地型城市扩展, 以减缓城市扩展过程对生态系统服务的影响。

参考文献(References):

- [1] MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis [M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystem and Human Well-being: Desertification Synthesis [M]. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.
- [3] REYNOLDS J F, SMITH D M, LAMBIN E F, et al. Global desertification: Building a science for dryland development [J]. *Science*, 2007, 316(5826): 847-851.
- [4] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 等. 中国快速城市化干旱地的生态系统服务权衡关系多尺度分析: 以呼包鄂榆地区为例 [J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4881-4891. [SUN Z X, LIU Z F, HE C Y, et al. Multi-scale analysis of ecosystem service trade-offs in urbanizing drylands of China: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin region. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4881-4891.]
- [5] LI J W, LIU Z F, HE C Y, et al. Are the drylands in northern China sustainable? A perspective from ecological footprint dynamics from 1990 to 2010 [J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 553: 223-231.
- [6] 国务院人口普查办公室, 国家统计局人口统计司. 中国 1990 年人口普查资料 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1993. [Population Census Office of China and Department of Population Statistics of China. Tabulation on the 1990 Population Census of the People's Republic of China. Beijing: China Statistics Press, 1993.]
- [7] 国务院人口普查办公室, 国家统计局人口和就业统计司. 中国 2010 年人口普查资料 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2010. [Population Census Office of China and Department of Population and Employment Statistics of China. Tabulation on the 2010 Population Census of the People's Republic of China. Beijing: China Statistics Press, 2012.]
- [8] LIU J Y, ZHANG Q, HU Y F. Regional differences of China's urban expansion from late 20th to early 21st century based on remote sensing information [J]. *Chinese Geographical Science*, 2012, 22(1): 1-14.
- [9] HUANG Q X, HE C Y, LIU Z F, et al. Modeling the impacts of drying trend scenarios on land systems in northern China using an integrated SD and CA model [J]. *Science China-Earth Sciences*, 2014, 57(4): 839-854.
- [10] TIAN G J, QIAO Z. Assessing the impact of the urbanization process on net primary productivity in China in 1989-2000 [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184: 320-326.
- [11] 刘纪远, 徐新良, 庄大方, 等. 20 世纪 90 年代 LUCC 过程对中国农田光温生产潜力的影响——基于气候观测与遥感土地利用动态观测数据 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(6): 483-492. [Liu J Y, Xu X L, Zhuang D F, et al. Impacts of LUCC processes on potential land productivity in China in the 1990s. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(8): 1259-1269.]
- [12] GAO Z Q, LIU J Y, CAO M K, et al. Impacts of land-use and climate changes on ecosystem productivity and carbon cycle in the cropping-grazing transitional zone in China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(9): 1479-1491.
- [13] LIU X R, SHEN Y J, GUO Y, et al. Modeling demand/supply of water resources in the arid region of northwestern China during the late 1980s to 2010 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(5): 573-591.
- [14] FU B J, LIU Y, LU Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [15] JIA X Q, FU B J, FENG X M, et al. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103-113.
- [16] 王静爱, 左伟. 中国地理图集 [M]. 北京: 中国地图出版社, 2010. [Wang J A, Zuo W. Geographic Atlas of China. Beijing: SinoMaps Press, 2010.]

- [17] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古统计年鉴 1991 [M]. 内蒙古: 中国统计出版社, 1991. [Inner Mongolia Autonomous Region Bureau of Statistics. Inner Mongolia Statistical Yearbook 1991. Beijing: China Statistics Press, 1991.]
- [18] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古统计年鉴 2014 [M]. 内蒙古: 中国统计出版社, 2014. [Inner Mongolia Autonomous Region Bureau of Statistics. Inner Mongolia Statistical Yearbook 2014. Beijing: China Statistics Press, 2014.]
- [19] 国家统计局社会经济调查总队. 中国城市统计年鉴 1991 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1991. [Department of Urban Surveys of China. China City Statistical Yearbook 1991. Beijing: China Statistics Press, 1991.]
- [20] ZHANG Z X, WANG X, ZHAO X L, et al. A 2010 update of National Land Use/Cover Database of China at 1:100000 scale using medium spatial resolution satellite images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149: 142-154.
- [21] LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 195-210.
- [22] 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.
- [23] LIU J Y, LIU M L, TIAN H Q, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(4): 442-456.
- [24] PERRY M, HOLLIS D. The generation of monthly gridded datasets for a range of climatic variables over the UK [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(8): 1041-1054.
- [25] TUCKER C J, PINZON, J. E., BROWN, M. E. Global Inventory Modeling and Mapping Studies, NA94apr15b.n11-VIg, 2.0 [M]. Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland, 04/15/1994. 2004.
- [26] HOLBEN B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [27] TALLIS H T, RICKETTS T, GUERRY A D, et al. InVEST 2.6.0 User's Guide [M]. Stanford: The Natural Capital Project, 2013.
- [28] 包玉斌, 刘康, 李婷, 等. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例 [J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 622-629. [Bao Y B, Liu K, Li T, et al. Effects of land use change on habitat based on invest model--taking yellow river wetland nature reserve in shaanxi province as an example. *Arid Zone Research*, 2015, 32(3): 622-629.]
- [29] JU W M, GAO P, ZHOU Y L, et al. Prediction of summer grain crop yield with a process-based ecosystem model and remote sensing data for the northern area of the Jiangsu Province, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(6): 1573-1587.
- [30] BUYANTUYEV A, WU J. Urbanization alters spatiotemporal patterns of ecosystem primary production: A case study of the Phoenix metropolitan region, USA [J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(4-5): 512-520.
- [31] FANG J Y, GUO Z D, PIAO S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000 [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1341-1350.
- [32] FANG J Y, YANG Y H, MA W H, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands [J]. *Science China: Life Sciences*, 2010, 53(7): 757-765.
- [33] 程积民, 程杰, 杨晓梅, 等. 黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征 [J]. 生态学报, 2012, 32(1): 226-237. [Cheng J M, Cheng J, Yang X M, et al. Spatial distribution of carbon density in grassland vegetation of the Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 226-237.]
- [34] 张靖, 同丽嘎, 李政海, 等. 内蒙古乌审旗有机碳库变化分析及其增汇调控途径 [J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2552-2559. [Zhang J, Tong L G, Li Z H, et al. Analysis of organic carbon sink increment and management in Uxin Banner, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(9): 2552-2559.]
- [35] XU M, HE C Y, LIU Z F, et al. How did urban land expand in China between 1992 and 2015? A multi-scale landscape analysis [J]. *Plos One*, 2016, 11(5): 1-19.
- [36] 谢文瑄, 黄庆旭, 何春阳. 山东半岛城市扩展模式与生态足迹的关系 [J]. 生态学报, 2017, 37(3). [Xie W X, HUANG Q X, HE C Y. A study on urban expansion modes and regional ecological footprints in the Shandong Peninsula Urban Agglomeration. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(3).]
- [37] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用 [J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1430-1438. [Liu X P, Li X, Chen Y M, et al. Landscape Expansion Index and Its Applications to Quantitative Analysis of Urban Expansion. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(12): 1430-1438.]
- [38] LIU X P, LI X, CHEN Y M, et al. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data [J]. *Landscape Ecology*, 2010, 25(5): 671-682.
- [39] HE C Y, ZHANG D, HUANG Q X, et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 44-58.

- [40] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 城市化对流域生态系统服务价值空间异质性的影响——以南京市九乡河流域为例 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1715-1725. [HU H B, LIU H Y, HAO J F, et al. Effects of urbanization on the spatial heterogeneity of watershed ecosystem services value: A case study of Jiuxiang river watershed in Nanjing city. *Journal of Natural Resources*, 26(10): 1715-1725.]
- [41] 黄庆旭, 何春阳, 史培军, 等. 城市扩展多尺度驱动机制分析——以北京为例 [J]. 经济地理, 2009, 29(5): 714-721. [HUANG Q X, HE C Y, SHI P J, et al. Understanding multi-scale urban expansion driving forces: In the case study of Beijing. *Economic Geography*, 2009, 29(5): 714-721.]
- [42] ADAMOWICZ W L, NAIDOO R, NELSON E, et al. Nature-based tourism and recreation [M]/KAREIVA P, TALLIS H, RICKETTS T H, et al. *Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*. New York; Oxford University Press. 2011.

Impacts of urban expansion on ecosystem services in the drylands of northern China: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos urban agglomeration region

SUN Ze-xiang^{1,3}, LIU Zhi-feng^{1,2,*}, He Chun-yang^{1,2}, WU Jian-guo^{1,2,4}

(1. Center for Human - Environment System Sustainability (CHESS), Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (ESPRE), Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. School of Life Sciences and Global Institute of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA)

Abstract: Understanding the impacts of urban expansion on ecosystem services (ESs) in the drylands of northern China is important for improving regional human well-being and sustainability. However, assessments on the impacts of urban expansion on ESs in the drylands of northern China have been inadequate. In this paper, we assessed the impacts of urban expansion on ESs in the Hohhot-Baotou-Ordos (HBO) urban agglomeration region - a rapidly urbanizing dryland region in northern China - at three scales: the urban agglomeration, city, and county. First, we quantified four key ESs in HBO in 1990, including habitat quality (HQ), crop production (CP), meat production (MP), and carbon storage (CS). Second, we analyzed the processes and modes of urban expansion in HBO during 1990-2013. Finally, we evaluated the influences of urban expansion on ESs at the urban agglomeration, city, and county scales. We found that the HBO region experienced a rapid urban expansion between 1990 and 2013, with urban land area increasing from 314.22 km² to 692.10 km² and a growth of 1.2 times. The rapid urban expansion in HBO region resulted in obvious decreases of the four key ESs. Among these ESs, CP suffered the worst losses, with a decrease of 13581.41 t, accounting for 0.99% of total CP in HBO in 1990. **At the same time, MP and CS decreased by 70.19 t and 1.65TgC, accounting for 0.25% of total MP and 0.29% of total CS in HBO in 1990, respectively. In addition, HQ decreased by 0.47, and accounting for 88.68% of the mean HQ in HBO in 1990.** The two modes of urban growth - edge expansion and leapfrog - had the greatest impacts on ESs in HBO region. Between 1990 and 2013, the decreases of CP, MP, and CS caused by edge expansion accounted for more than 60% of the decreases of these ESs in HBO. The losses of MP caused by leapfrog accounted for more than 1/3 of the losses of these ESs in HBO. The large-scale decreases of cropland and grassland during the urban growth of edge expansion and leapfrog were the main causes for the losses of ESs.

Thus, we suggest that efficient utilization of urban land and effective management with respect to urban growth of edge expansion and leapfrog are needed to confine the impacts of urban expansion on ESs in HBO.

Keywords: ecosystem service;urban expansion; the drylands of northern China; Hohhot-Baotou-Ordos (HBO); urban growth mode;multi-scale analysis

