

DOI: 10.5846/stxb201501290243

王莉雁,肖焱,江凌,饶恩明,欧阳志云,郑华.城镇化发展对呼包鄂地区生态系统服务功能的影响.生态学报,2016,36(19):6031-6039.

Wang L Y, Xiao Y, Jiang L, Rao E M, Ouyang Z Y, Zheng H. The influence of urbanization on ecosystem services in the Hohhot-Baotou-Ordos region. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6031-6039.

城镇化发展对呼包鄂地区生态系统服务功能的影响

王莉雁,肖焱*,江凌,饶恩明,欧阳志云,郑华

中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

摘要: 城镇化是社会经济发展和现代文明的重要标志。城镇化的发展对区域生态系统产生巨大的影响,进而影响了区域生态系统为人类提供生态系统服务的能力。以呼包鄂地区为研究对象,选取防风固沙功能、土壤保持功能,运用冗余分析方法(RDA)探讨快速城镇化对生态系统服务功能的影响机制。结果表明:(1)2000—2010年,呼包鄂地区城镇化发展迅速,城镇人口、常住人口城镇化率、国内生产总值、建设用地面积分别增加83.39%、35.52%、1150.00%、51.91%;(2)防风固沙功能、土壤保持功能10年呈增强趋势,分别增加20.17%和4.39%;(3)RDA分析结果表明,温度、降雨天数、风速、常住人口城镇化率、建设用地指数是呼包鄂地区防风固沙功能变化的主要影响因素,5个因子的共同解释信息量达68.3%;其中常住人口城镇化率和建设用地指数的解释信息量较高,分别为21.5%、34.2%;(4)常住人口城镇化率与防风固沙功能、土壤保持功能呈显著正相关($P < 0.05$),建设用地指数与防风固沙功能呈极显著负相关($P < 0.01$)。因此,有序推进农村人口转移,提高常住人口城市化率;集约利用土地资源,抵制建设用地的无序扩张是实现呼包鄂地区生态系统与城镇可持续发展的重要途径。

关键词: 城镇化;生态系统服务功能;RDA;呼包鄂地区

The influence of urbanization on ecosystem services in the Hohhot-Baotou-Ordos region

WANG Liyan, XIAO Yi*, JIANG Ling, RAO Enming, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua

Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Beijing 100085, China

Abstract: Urbanization is an important facet of economic development, and one of the most significant economic and social phenomena of the contemporary era. However, it is considered to have detrimental impacts on regional ecological systems, which could affect the ability of ecosystems to provide human services. Hohhot-Baotou-Ordos, is located in the midwest of Inner Mongolia, which is known as “golden triangle” region of Inner Mongolia. This area is experiencing rapid urbanization, and is becoming the most important economic and urbanized belt of Inner Mongolia, and also one of the richest regions in China. Furthermore, this region is famous for sand-fixing and soil conservation. Thus, it is vital to understand how urbanization change is influencing ecosystem services in the Hohhot-Baotou-Ordos region. In this paper, we analyze the changes in urbanization and ecosystem services (sand-fixing and soil conservation) that occurred between 2000 and 2010 in the Hohhot-Baotou-Ordos region. We then used redundancy analysis (RDA) to reveal the relationships between urbanization and ecosystem services in the Hohhot-Baotou-Ordos region. The results showed the following. (1) Urbanization progressed sharply from 2000 to 2010 in the Hohhot-Baotou-Ordos region. The urban population, the resident population urbanization rate, gross domestic product (GDP), and the index of construction land increased by 83.39%, 35.52%, 1150.00%, and 51.91%, respectively. (2) There was an obvious increase in sand-fixing and soil conservation (20.17%

基金项目:中国科学院科技服务网络计划(KFJ-EW-ST5-002)

收稿日期:2015-01-29; 修订日期:2016-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoyi@rcees.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

and 4.39% , respectively) . (3) Correlation analysis showed that the changes in sand-fixing and soil conservation were positively correlated ($P<0.05$) with the change in permanent residents urbanization rate , and were negatively correlated ($P<0.01$) with the change in the index of construction land. Furthermore , an RDA two-dimensional ordination diagram indicated that temperature , precipitation days , wind speed , the urbanization rate of permanent residents , and the index of construction land were the main influence factors of sand-fixing , which could significantly explain 68.3% of the data. The explanation of the urbanization rate of permanent residents and the index of construction land were higher , 21.5% and 34.2% respectively. On the basis of the results , certain management strategies are recommended for sustainable development of city and ecosystem. Firstly , we should promote a greater migration of the rural population into urban areas , properly adjust the number of villages and small towns and increase the number of large towns. Secondly , the government should make more reasonable plans for urban development , prohibit the disorderly expansion of construction land , and increase the regional ecological support to towns. Thirdly , we should use land resources in an economical and intensive way and expand urban ecological space by converting city land and other polluted land into natural landscapes , with the purpose of realizing green urbanization and finally to realize the win-win situation of having urbanization and ecological system.

Key Words: urbanization; ecosystem service; RDA; Hohhot-Baotou-Ordos region

生态系统服务功能是指生态系统所形成和所维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用,是人类赖以生存的基础,与人类福利息息相关^[1-2],生态服务功能的可持续供给是经济社会可持续发展的基础^[3]。随着人们对生态系统服务功能的理解逐渐加深,众多研究者在生态系统服务功能的影响因素和管理措施上做了大量的研究^[4-5]。城镇化是人类经济社会发展的客观要求和必然选择^[6-7],城镇化蕴含了大量的人类活动信息,其改变了地表景观格局、生态过程、生物栖息地、生物地球化学循环等,强烈的冲击着生态系统的结构和功能及空间演变,特别是影响了生态系统为人类提供生态系统服务的能力。因此揭示城镇化对生态系统服务功能格局的影响机制已成为国际科学界研究的热点和前沿^[8-10]。目前国内外关于城镇化对生态系统的研究主要集中在城镇化产生的生态风险、生态环境问题等方面^[11-19],对关于城镇化对生态系统服务功能的影响方面的研究较少。自改革开放以来,中国城镇化取得了举世瞩目的成就^[20],我国城镇化经历了一个起点低、速度快的发展过程。1980年,刚刚改革开放之初,中国百万人口以上的特大城市仅有15个,1990年达到31个,2012年则达到65个,成为世界上特大城市、超大城市最多的国家之一^[21]。1978—2013年,城镇常住人口从1.7亿人增加到7.3亿人,城市化率从17.9%提升到53.7%,到2020年,中国城镇化水平将达到60%左右^[22],总体上>70%的时间大致在2035—2040年间,因此中国城镇化仍将保持较快的推进势头^[23-24],对生态系统及生态系统服务功能的影响也将日趋显著。

呼包鄂地区地处内蒙古中西部,属于典型的干旱、半干旱大陆性季风气候,草地和沙地是主要的生态系统类型,充沛的沙源和频发的大风气候使呼包鄂地区饱受土壤风蚀的侵扰,呼包鄂地区已经成为我国重要的沙尘源之一,防风固沙功能、土壤保持功能是呼包鄂地区主要的生态系统服务功能。近年来,随着西部大开发战略和国家新型城镇化的不断推进,呼包鄂地区的区位和资源优势逐步得以释放,经济发展速度明显加快,到2010年,常住人口城镇化率高达70.35%,城镇化的快速发展所带来的高强度人类活动和剧烈的土地类型转变加剧了土壤侵蚀过程,对周边国家和地区的人民正常的生产基础、生活环境乃至生命产生巨大的威胁^[25],因此,研究快速发展的城镇化与生态系统的防风固沙、土壤保持服务功能之间的关系,对区域生态系统服务功能的恢复和改善具有重要意义。

1 研究区概况

呼包鄂地区是内蒙古自治区中西部的核心区(图1),包括呼和浩特市、包头市、鄂尔多斯市,呈“品”字型分布,土地面积为13.16万km²,占全区面积的11.49%。到2010年,城镇人口为524.67万人,占全区域

镇人口的 38.24%; 经济总量为 6970.00 亿元, 占全区经济总量的 54.23%, 是内蒙古自治区经济总量的“半壁江山”, 经济地理位置优越, 被誉为内蒙古的“金三角”地区。

呼包鄂地区地处内蒙古高原中部, 属黄河中上游地区, 黄河境内流长 728 km。气候为典型的干旱、半干旱大陆性季风气候, 四季变化明显, 夏季炎热少雨, 冬季严寒少雪, 春秋两季气候变化剧烈, 降雨少, 蒸发大; 地貌类型多样, 有山地、丘陵、平原、沙漠、沙地等, 是我国沙尘暴的主要来源地之一; 草地、沙漠、农田是研究区主要的生态系统类型, 其中草地生态系统面积为 8.33 万 km², 占呼包鄂总面积的 63.41%; 沙漠生态系统面积为 1.70 万 km², 占呼包鄂总面积的 12.91%; 农田生态系统的面积为 1.43 万 km², 占呼包鄂总面积的 10.92%。

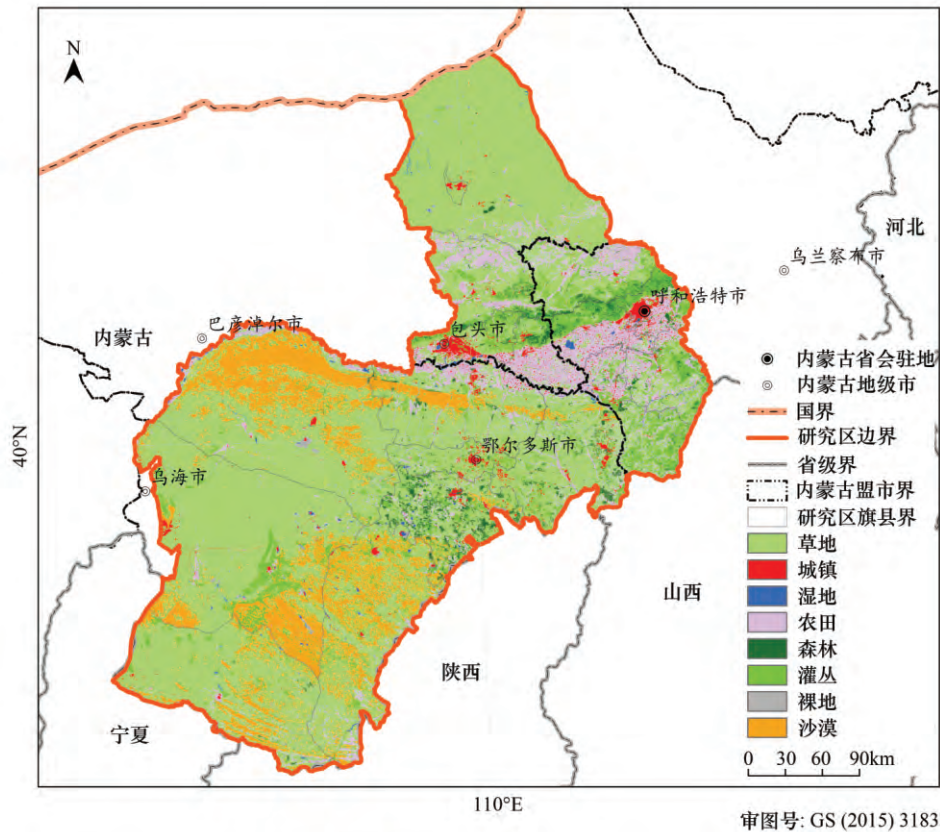


图 1 研究区生态系统类型图

Fig.1 The type of ecosystem in study area

2 数据来源与研究方法

2.1 研究方法

2.1.1 土壤保持功能

本文选择土壤保持强度衡量土壤保持功能。运用通用土壤流失方程 (USLE, Universal Soil Loss Equation) 来估算呼包鄂地区潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量, 两者之差为呼包鄂地区生态系统土壤保持量。

潜在土壤侵蚀量为生态系统在没有地表植被覆盖和水土保持措施情况下的土壤侵蚀量。在通用土壤流失方程中不考虑地表植被覆盖因素和水土保持因素, 此时土壤流失方程为:

$$S_{潜} = R \cdot K \cdot LS \quad (1)$$

实际土壤侵蚀量则考虑地表覆盖因素和水土保持因素, 此时通用土壤流失方程为:

$$S_{\text{实}} = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2)$$

结合(1)和(2),计算得出呼包鄂地区生态系统土壤保持量:

$$SC = S_{\text{潜}} - S_{\text{实}}$$

式中, SC 为土壤保持量($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); $S_{\text{潜}}$ 为潜在土壤侵蚀量($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), $S_{\text{实}}$ 为实际土壤侵蚀量($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$), K 为土壤可蚀性因子($\text{t hm}^2 \text{h hm}^{-2} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$), LS 为地形因子, C 为植被覆盖度因子, P 为土壤保持措施因子。

2.1.2 防风固沙功能

本文在充分考虑呼包鄂地区的气候条件、植被情况、土壤可蚀性、土壤粗糙度、土壤结皮的情况下,采用修正风蚀方程(RWEQ, Revised Wind Erosion Equation)估算土壤风蚀量。

$$S_L = \frac{2 \cdot z}{S^2} Q_{\text{max}} \cdot e^{-(z/S)^2}$$

$$S = 150.71 (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711}$$

$$Q_{\text{max}} = 109.8 (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)$$

式中, S_L 为风力侵蚀量($\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$); Q_{max} 为最大转移量(kg/m); S 为关键地块长度(m); z 为最大风蚀出现距离(m); WF 为气候侵蚀因子(kg/m); K' 为地表粗糙度因子; EF 为土壤侵蚀因子; SCF 为土壤结皮因子; C 为植被覆盖因子。

生态系统防风固沙量即为没有地表植被覆盖条件下的潜在土壤风蚀量与地表覆盖植被条件下的实际土壤风蚀量的差值表示。

$$S_{L\text{固}} = S_{L\text{潜}} - S_{L\text{实}}$$

式中, $S_{L\text{固}}$ 为生态系统防风固沙量($\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$), $S_{L\text{潜}}$ 为没有地表植被覆盖条件下的潜在土壤风蚀量($\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$), $S_{L\text{实}}$ 为有地表植被覆盖条件下的实际土壤风蚀量($\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$)。

生态系统防风固沙量可以表示为生态系统实际的固沙量,由于受气候因素的影响,单纯的防风固沙量并不能有效的凸显生态系统本身对防风固沙的贡献大小。为了进一步的分析生态系统的防风固沙作用,本文选择固沙率来衡量生态系统的防风固沙功能,即生态系统防风固沙量与潜在土壤风蚀量的比值。

$$R = S_{L\text{固}} / S_{L\text{潜}} \times 100$$

式中, R 为固沙率, $S_{L\text{固}}$ 为生态系统防风固沙量($\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$), $S_{L\text{潜}}$ 为没有地表植被覆盖条件下下的实际土壤风蚀量($\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$)。

2.1.3 冗余分析(RDA)

冗余分析(RDA)是一种直接梯度分析方法,最大的优势在于能够独立保持各个变量对解释变量的贡献率。在本文中,将生态系统服务功能指标视为响应变量;各影响因子指标视为解释变量,选用气象因子(温度、降雨量、降雨天数、风速、大风天数)、城镇化指标(常住人口、城镇人口、城镇化率、城镇人口密度、二三产业总值所占比例、建设用地面积、建设用地指数等)共20个指标。由于各影响因子之间具有明显的自相关作用,可能会影响研究结果的准确性。因此,利用RDA冗余分析简化因子,选择易测定分析,对生态系统服务功能影响大的因子至关重要。RDA二维排序图可以直观的展现城镇化与生态系统服务功能之间的关系。排序结果图中,根据响应变量(服务功能因子)与解释变量(影响因子)之间的夹角,判断其对生态系统服务功能的影响方式,若两者之间小于 90° ,那么两者之间为正向相关,服务功能因子会随着影响因子的增大而增大,若夹角大于 90° ,两者之间呈负相关,若夹角等于 90° ,则不存在相关。另外,影响因子箭头的长度表示其对生态系统服务功能因子的综合影响程度,箭头越长,影响程度越高。

2.2 数据来源

人口、经济数据来源于《2000年内蒙古统计年鉴》、《2010年内蒙古统计年鉴》、第五次人口普查、第六次人口普查统计数据等;本研究使用的DEM数据来自SRTM(Shuttle Radar Topography Mission),精度为90m;

<http://www.ecologica.cn>

土壤图及其属性数据(包括土壤粘粒、粉粒、砂粒以及土壤有机质百分含量)来自第二次全国土壤普查,精度为 1:1000000; 2000 年和 2010 年的生态系统类型和植被覆盖度数据来自中国科学院遥感所,精度分别为 90 m 和 250 m; 气象数据(降雨、气温、风速等月均数据)来自中国气象科学数据共享网; 行政区划数据来自环保部卫星中心。

3 城镇化与生态系统服务功能结果分析

3.1 城镇化水平结果分析

城镇化是衡量一个国家经济社会发展水平的标志,涉及人口结构、经济结构和城市建设等多方面因素。2000 年,内蒙古确立了以呼包鄂为核心的特色经济圈建设的发展战略,为该地区城镇化的发展提供了政策保障。2000—2010 年,呼包鄂地区城镇化水平实现突飞猛进的增长。

2000—2010 年,总人口增加 194.65 万人,增幅为 35.32%,其中城镇人增加了 238.57 万人,增幅为 83.39%,约为全国城镇人口增长水平 1.75 倍,城市化率增长 35.52%。城市经济结构也发生了明显的变化,以第二、三产业为主,二三产业生产总值的增长幅度远远大于第一产业的增长幅度。2010 年,呼包鄂地区第二、三产业总产值为 6741.11 亿元,占呼包鄂地区总国民生产总值的 96.72%,相比 2000 年,国民生产总值提高了约 10 倍。城市空间格局也发生了明显的变化。建设用地面积增长了 51.91%,约为全国增长水平的 1.91 倍,其中采矿场面积变化最大,增幅高达 261.00%,约为全国增长水平的 3.65 倍。

表 1 研究区城镇化发展水平 10a 变化
Table 1 The changes of urbanization of study area (2000—2010)

城镇化指标 Index	2000	2010	2000—2010		全国增幅/% National rate of change
			变化量 Change	变化幅度/% Rate of change	
总人口 Total population/万人	551.12	745.77	194.65	35.32	5.80
城镇人口 Urban population/万人	286.10	524.67	238.57	83.39	47.57
常住人口城市化率/% Urbanization rate of permanent residents	51.91	70.35	18.44	35.52	36.45
建设用地 Construction land/km ²	1596.56	2425.36	828.80	51.91	27.24
居住地 Apartment/km ²	1032.34	1275.73	243.39	23.58	23.01
工业用地 Industrial land/km ²	241.97	440.96	198.99	82.24	87.39
采矿场 Mine stope/km ²	128.15	462.62	334.47	261.00	71.76
交通用地 Traffic land/km ²	194.10	246.06	51.96	26.77	36.02
生产总值 Gross domestic product/亿元	557.60	6970.00	6412.40	1150.00	304.38
第一产业 GDP/亿元 The first industry gross domestic product	68.78	228.62	159.84	232.39	171.22
第二产业 GDP/亿元 The second industry gross domestic product	304.92	3561.83	3256.91	1068.12	311.76
第三产业 GDP/亿元 The third industry gross domestic product	183.90	3179.28	2995.38	1628.81	347.09

3.2 生态系统服务功能结果分析

2000—2010 年,生态系统防风固沙功能 10a 增幅为 20.17%。防风固沙功能呈现总体增强,局部退化的趋势,增强区域面积占呼包鄂地区总面积的 60.63%,不变和退化区域面积各占呼包鄂地区总面积的 31.37% 和 8.00%(图 2,表 2)。

2000—2010 年,生态系统土壤保持功能 10a 增幅为 4.39%。土壤保持功能呈现小幅度增强,局部减弱的趋势,不变和退化区域面积各占呼包鄂地区总面积的 74.11%和 9.23%(图 2,表 2)。

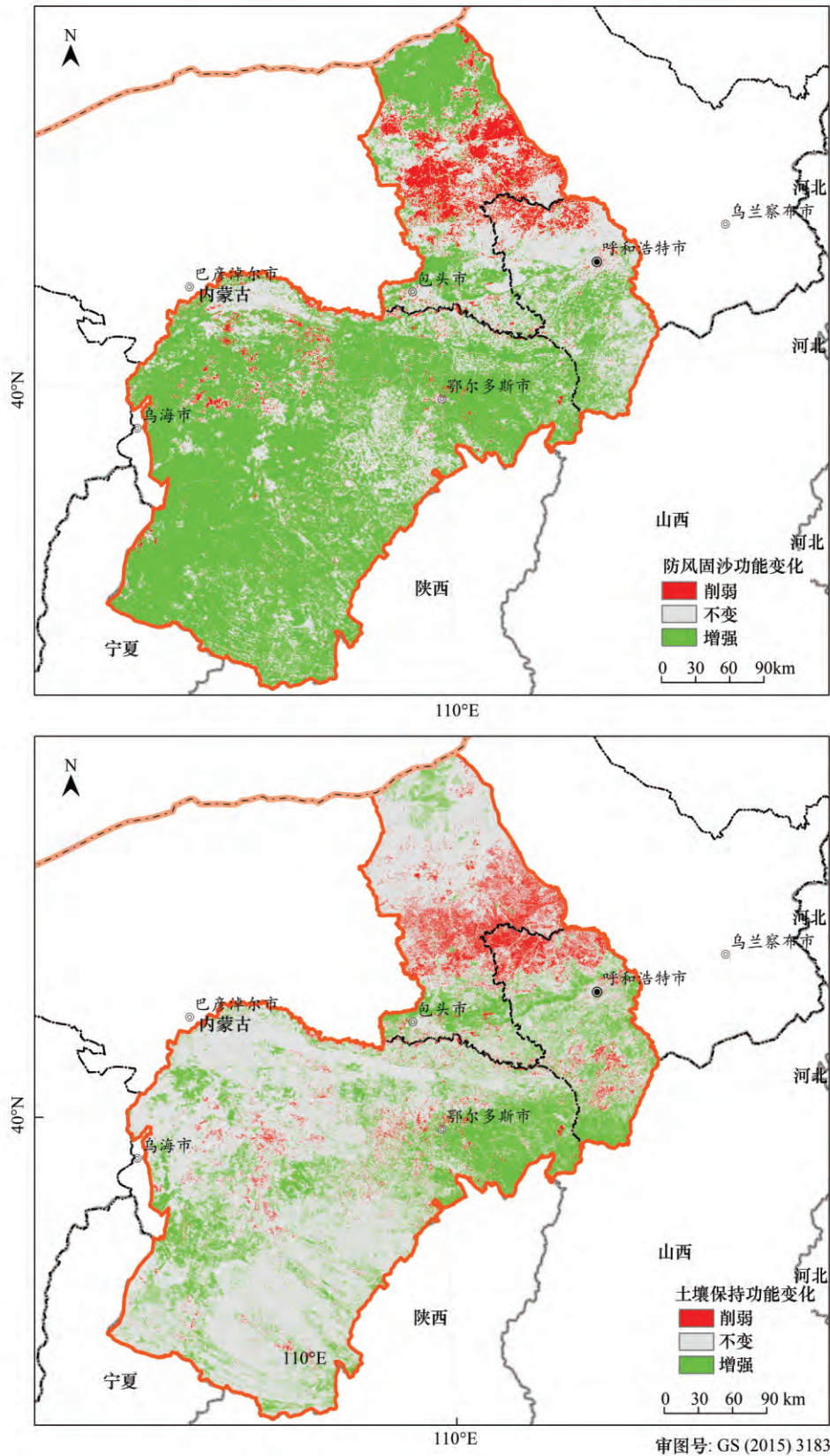


图2 研究区防风固沙功能与水土保持功能变化空间格局

Fig.2 Changes of sand-fixing service and soil conservation service in study area (2000—2010)

<http://www.ecologica.cn>

表 2 研究区防风固沙功能与土壤保持功能变化表(2000—2010 年)

Table 2 Changes of sand-fixing service and soil conservation service in study area (2000—2010)

变化 Change	防风固沙功能 Sand-fixing service		土壤保持功能 Soil conservation service	
	面积 Area/km ²	比例 Percentage/%	面积 Area/km ²	比例 Percentage/%
退化 Degradation	10461.85	8.00	8147.69	9.23
未变 Invariability	41010.54	31.37	96901.58	74.11
增强 Enhancement	79281.80	60.63	25704.93	19.66

变幅在±3%以内为未变

3.3 城镇化与生态系统服务功能之间的影响机制

从表 3 可以看出城镇化与防风固沙功能、土壤保持功能之间存在较强的相关关系,其中常住人口城市化率与防风固沙功能、土壤保持功能呈显著正相关($P<0.05$),相关性指数为 0.458、0.422;建设用地指数与防风固沙功能呈极显著负相关($P<0.01$),相关性指数为-0.621;与土壤保持功能呈负相关,相关性不显著(表 3)。

为了更好的揭示呼包鄂地区防风固沙功能与城镇化之间的相互关系,选取气象因子和城镇化指标等共 20 个指标与固沙率、固沙强度进行 RDA 冗余分析。结果表明,温度、降雨天数、风速、常住人口城市化率、建设用地指数 5 项因子是作为解释防风固沙功能变化的最小变量组合,5 项因子均经过蒙特卡罗置换检验,防风固沙功能与温度、降雨天数、风速、常住人口城市化率、建设用地指数均具有统计学意义($P<0.05$),分别解释了 16.7%、38.6%、12.1%、21.5%、34.2%的防风固沙功能变化趋势,综合解释防风固沙变化达 68.3%,第一排序轴信息量高达 65.5%,第二排序轴仅解释了 2.8%的信息量,再次表明利用温度、降雨天数、风速、常住人口城市化率、建设用地指数作为表征影响防风固沙功能变化的因素是可行的(表 4 图 3)。

表 3 生态系统服务功能与影响因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of impact factors of ecosystem service

影响因子 Impact factor	温度 Temperature	降雨天数 Precipitation day	风速 Wind speed	常住人口城市化率 Urbanization rate of permanent residents	建设用地指数 Index of construction land
防风固沙功能 Sand-fixing service	-0.508 **	-0.583 **	-0.422 *	0.458 *	-0.621 **

影响因子 Impact factor	温度 Temperature	降雨量 Precipitation	常住人口城市化率 Urbanization rate of permanent residents	建设用地指数 Index of construction land
土壤保持功能 Soil conservation service	0.395 *	-0.553 **	0.422 *	-0.202

表 4 RDA 分析最小解释变量组合特征

Table 4 The characteristics of the smallest combination of explanatory variables in RDA analysis

变量名 Variable name	膨胀系数 Inflation factor	<i>P</i>	<i>F</i>
降雨天数 Precipitation day	1.74	0.002	15.06
风速 Wind speed	2.46	0.05	3.30
温度 Temperature	1.81	0.028	4.82
常住人口城市化率 Urbanization rate of permanent residents	1.25	0.014	6.59
建设用地指数 Index of construction land	1.21	0.002	12.49

4 结论与讨论

城镇的发展深受资源、工业化经济、城市人口等多因素的影响^[26],城镇化对生态系统有着深远的影响,

<http://www.ecologica.cn>

城镇化造成人口膨胀、耕地资源减少、环境污染等众多环境问题^[27-30]，但健康稳定的城镇化不仅是提升人们生活品质的有效方式，也是缓解资源环境压力的重要手段，尤其在近 10 年在国家生态恢复的政策导向下，城镇化不一定导致区域生态系统服务功能的下降^[32]。本研究表明：

(1) 防风固沙功能、土壤保持功能均与常住人口城市化率呈显著正相关，说明常住人口城市化率的提高有助于改善生态系统的防风固沙功能和土壤保持功能。随着西部大开发的不断推进，2000—2010 年呼包鄂步入快速城镇化时期，非农企业向城市聚集，吸纳了大量农村劳动力转移就业，促进了乡村人口逐渐向城市人口转移，城镇人口大幅度增加，农村人口迅速下降，以农牧业为主的农业活动减少，大大减轻了对生态系统的人为活动压力。

(2) 防风固沙功能与建设用地指数呈极显著负相关，表明城镇化过程中建设用地的扩张不利于防风固沙功能的改善。呼包鄂地区是以工矿业为主的资源性城市，2000—2010 年，其城镇建设用地面积增加 828.80 km²，增幅为 51.91%，其中居住地增加 23.58%，工业用地增加 82.24%，交通用地增加 26.77%，采矿场面积增加 261.00%。在 2009 年召开的煤机气态能源国际高峰论坛上指出，呼包鄂地区对资源的依赖性太强^[31]。资源的散点分布特点导致集约紧凑的城镇化土地利用模式在呼包鄂地区实施难度较大，分散化的建设用地布局显然干扰了生态用地的完整性^[32]，城镇化的负面影响客观存在。2000—2010 年，呼包鄂地区建设用地面积增长速度远高于常住城镇人口的增长速度，“土地城镇化”快于“人口城镇化”^[22]，建设用地以外延扩张为主，粗放低效，过分追求宽马路、大广场、新城城区、工矿用地等。建设用地的不断无序扩张改变地表景观格局、生态环境、生态空间演变结构、生态系统物质循环过程等，使得自然植被遭到破坏，破坏土地结构稳定性；采矿场面积的不断扩大使得生物多样性减少，植被破坏，大量地表土壤裸露、土地塌陷，占用大量的生态用地，加快了土地沙化的扩展速度^[33]，甚至引起区域生态系统服务功能的急剧恶化。

因此，城镇化是一把双刃剑，城镇化与生态系统服务功能之间的关系并不能简单的归纳为正向或者负向影响。为实现生态系统与城镇的可持续发展，要理性进行城镇化建设，一要以人的城镇化为核心，合理引导人口流动，有序推进农业转移人口城市化；二要严格控制城镇建设用地规模，优化城市内部空间结构，提高国土空间利用率；三要强化环境保护与生态修复，减少对自然的干扰和损害，推动形成绿色低碳的城市建设运营方式。

参考文献(References):

- [1] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystem. Washington D C: Island Press, 1997.
- [2] 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. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [3] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 罗跃初. 生态系统服务功能管理研究进展. 生态学报, 2013, 33(3): 702-710.
- [4] Daily G C, Matson P A. Ecosystem services: from theory to implementation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(25): 9455-9456.
- [5] Polasky S, Segerson K. Integrating Ecology and economics in the study of ecosystem services: some lessons learned. Annual Review of Resource Economics, 2009, 1: 409-434.
- [6] 刘勇. 中国城镇化战略研究. 北京: 经济科学出版社, 2004.
- [7] 许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [8] Alberti M. Maintaining ecological integrity and sustaining ecosystem function in urban areas. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2010, 2(3): 178-184.

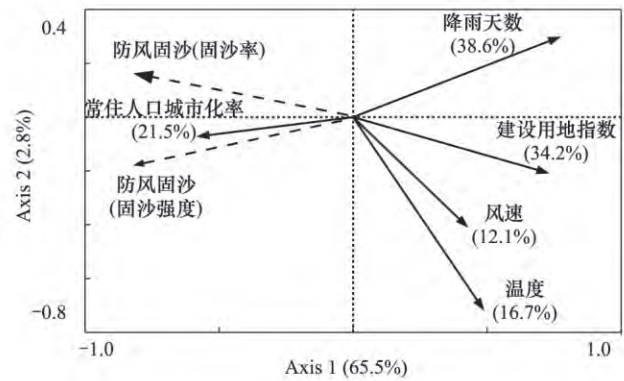


图3 生态系统防风固沙功能与5项影响因子RDA二维排序图
Fig.3 RDA two-dimensional ordination diagram of sand-fixing service and the 5 impact factors

- [9] Grimm N B, Grove J M, Pickett S T A, Redman C L. Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems//Marzluff J M, Shulenberg E, Endlicher W, Alberti M, Bradley G, Ryan C, Simon U, ZumBrunnen C, eds. *Urban Ecology*. New York: Springer, 2008: 123-141.
- [10] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, Nilon C H, Pouyat R V, Zipperer W C, Costanza R. Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socio-ecological components of metropolitan areas//Marzluff J M, Shulenberg E, Endlicher W, Alberti M, Bradley G, Ryan C, Simon U, ZumBrunnen C, eds. *Urban Ecology*. New York: Springer, 2008: 99-122.
- [11] 王桂新. 城市化基本理论与中国城市化的问题及对策. *人口研究*, 2013, 37(6): 43-51.
- [12] 重金属污染千万吨粮食 每年经济损失超两百亿. (2013-1-30) [2014-6-27]. <http://news.takungpao.com/paper>.
- [13] 陆大道, 贾绍凤, 白永平. 中国北方地区用水进入低增长和微增长阶段的必要性和可能性. *地理研究*, 2014, 33(2): 203-213.
- [14] Akbari H, Konopacki S. Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada. *Energy*, 2004, 29(2): 191-210.
- [15] Stone B Jr, Rodgers M O. Urban form and thermal efficiency: How the design of cities influences the urban island effect. *Journal of American Planning Association*, 2001, 67(2): 186-198.
- [16] King V J, Davis C. Isolating and managing urban islands in selected southeastern cities. [2004-05-30]. <http://www.ute.scsu.edu/Research/Reports/2003/heat-island.htm>, 2002.
- [17] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 262-269.
- [18] 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 69-77.
- [19] 史作民, 陈涛. 城市化及其对生态环境影响研究进展. *生态学杂志*, 1996, 15(1): 36-41.
- [20] 闫小培, 林彰平. 20世纪90年代中国城市发展空间差异变动分析. *地理学报*, 2004, 59(3): 437-445.
- [21] 段进军, 姚士谋, 陈明星, 龙花楼, 叶超. *中国城镇化研究报告*. 苏州: 苏州大学出版社, 2013.
- [22] 中共中央, 国务院. 国家新型城镇化规划(2014-2020年). 新华社, 2014-03-16. http://news.xinhuanet.com/house/bj/2014-03-17/c_126274610.htm.
- [23] 王梦奎. *中国中长期发展的重要问题(2006-2020)*. 北京: 中国发展出版社, 2005.
- [24] 顾朝林. *城镇体系规划: 理论·方法·实例*. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [25] 胡云峰, 刘纪远, 庄大方. 土壤风力侵蚀研究现状与进展. *地理科学进展*, 2003, 22(3): 288-295.
- [26] 董宁, 韩兴国, 邬建国. 内蒙古鄂尔多斯市城市化时空格局变化及其驱动力. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 1097-1103.
- [27] Alberti M. The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review*, 2005, 28(2): 168-192.
- [28] Grimm N B, Foster D, Groffman P, Grove J M, Hopkinson C S, Nadelhoffer K J, Pataki D E, Peters D P C. The changing landscape: Ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(5): 264-272.
- [29] 张耿杰, 白中科, 乔丽, 刘小翠. 平朔矿区生态系统服务功能价值情景模拟研究. *资源与产业*, 2009, 11(1): 1-4.
- [30] 李立新, 王兵, 周立波, 鱼小兵. 矿产资源开发生态景观风险评价. *矿产保护与利用*, 2011, 4(2): 1-5.
- [31] 崔楠. 呼包鄂: 正在崛起的现代化生态型城市群. *内蒙古日报*, 2010-04-07 [2015-01-20]. <http://inews.nmgnews.com.cn/system/2010/04/07/010412004.shtml>.
- [32] 刘焱序, 吴文恒, 温晓金, 张东海. 晋陕蒙能源区城镇化过程及其对生态环境的影响. *地理研究*, 2013, 32(11): 2010-2018.
- [33] 刘彦随, Gao J. 陕北长城沿线地区土地退化态势分析. *地理学报*, 2002, 57(4): 443-450.