

鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析

武文欢¹, 彭建^{1,2*}, 刘焱序², 胡熠娜²

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055;

2. 北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要:鄂尔多斯市是中国北方农牧交错带的中心,经济快速发展的同时带来生态环境巨大的压力,该区域生态系统服务及其相互关联的变化对半干旱地区的可持续发展具有重要意义。本文基于2000、2010年鄂尔多斯市的食物供给、碳储存、产水量以及土壤保持4种关键生态系统服务供给核算,采用相关分析探究栅格尺度上4种服务之间的权衡与协同关系,并引入玫瑰图对比不同土地利用类型的生态系统服务关联特征差异。研究结果表明:①2000-2010年鄂尔多斯市生态系统服务整体增强,平均食物供给量由 $99.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $224.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,碳储存量由 $8.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $8.41 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均产水量由 153.64 mm 增至 291.90 mm ,土壤保持量平均值由 $47.79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增至 $59.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;②产水与土壤保持之间存在协同关系(相关系数分别为0.972和0.771),食物供给与土壤保持之间存在协同关系(相关系数分别为0.505、0.736),食物供给和碳储存之间存在权衡关系(相关系数分别为-0.584、-0.512);③多重生态系统服务供给的热点区主要分布在鄂尔多斯市东部;④产水量和土壤保持、碳储存在耕地和林地中呈现此消彼长的变化方式,而在草地中4种生态系统服务同时增加。

关键词:生态系统服务;权衡与协同;热点区;鄂尔多斯市

1 引言

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的自然环境条件与效用(Daily et al, 1997),能为人类直接或间接地提供各种惠益(Costanza et al, 1997)。千年生态系统评估将生态系统服务分为4种类型,即:供给服务、调节服务、支持服务和文化服务(MA, 2005)。探究不同生态系统服务类型之间的关系已成为生态系统服务研究的核心议题之一(Wu, 2013)。不同生态系统服务间的具体相互作用关系复杂(Brauman et al, 2007; Barbier et al, 2008),但可抽象地归纳为权衡和协同2种主要关系。其中,权衡是指某种类型生态系统服务的增加或减少导致其他服务的减少或增加(Rodríguez et

al, 2006; Tallis et al, 2008; Qiu et al, 2013),协同则指2种或多种类型生态系统服务同时增加或减少(李鹏等, 2012; 戴尔阜等, 2016)。例如,森林砍伐、农业开垦以及城市化等人类活动的加强,一方面增加了食物、木材等供给服务;另一方面也造成了碳流失和土壤侵蚀的增加,生态系统服务之间的权衡关系日益突出(Bennett et al, 2009; Fu et al, 2015)。国内外研究业已证实,造林可增加碳汇量(Dymond et al, 2012)、调节气候,在土壤侵蚀严重的区域可起到水土保持的作用;但造林同时也会增大水分蒸散量,进而减少径流量(Schrobbach et al, 2011)。整体而言,目前不同研究区域生态系统服务间关联分析结果未能统一,尤其对于中国部分人地矛盾突出地域的多重生态系统服务之间关系尚未厘清。

收稿日期:2017-07;修订日期:2017-11。

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项经费课题(201511001-01)[Foundation: Commonwealth Project of Ministry of Land and Resources, No. 201511001-01]。

作者简介:武文欢(1993-),女,河北衡水人,硕士研究生,研究方向为综合自然地理和景观生态,E-mail: wuwenhuan1993@163.com。

通讯作者:彭建(1976-),男,博士,副教授,主要从事景观生态与土地利用、区域生态持续性评估等方面研究,E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn。

引用格式:武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 2017. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理科学进展, 36(12): 1571-1581. [Wu W H, Peng J, Liu Y X, et al. 2017. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City[J]. Progress in Geography, 36(12): 1571-1581.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.12.012

近年来,随着中国干旱、半干旱地区社会经济的不断发展,区域生态系统服务需求持续增长(杨莉等, 2012)。但区域生态系统供给能力又受到自然条件制约,致使生态系统服务供需矛盾日益突出,由此引发一系列社会经济和生态环境问题(方创琳等, 2001)。面对干旱、半干旱地区突出的人地矛盾,理解干旱、半干旱地区的生态系统服务权衡与协同关系对提高人类福祉和实现区域可持续发展具有重要指引意义(甄霖等, 2010; Wu, 2013; Yajdian et al, 2015)。因此,本文以位于中国北方农牧交错带中心区域的鄂尔多斯为例,计算 2000、2010 年食物供给、碳储存、产水量以及土壤保持 4 种关键生态系统服务,采用相关分析在栅格尺度上对 4 种服务之间的权衡与协同关系进行探究,并引入玫瑰图对比不同土地利用类型的生态系统服务变化特征,以期揭示干旱、半干旱地区生态系统调节、供给服务的权衡与协同关系,为可持续生态系统管理提供决策支持。

2 研究区域与数据

2.1 研究区

鄂尔多斯市位于内蒙古自治区的西南部,地处北纬 $37^{\circ}35'24''\sim 40^{\circ}51'40''$ 与东经 $106^{\circ}42'40''\sim 111^{\circ}27'20''$ 之间,包括 7 个旗 1 个区,总面积约 86800 km^2 (图 1)。该区地势西高东低,地貌类型以北部黄河冲积平原、中部毛乌素沙地和库布齐沙漠、东部丘陵沟壑和西部波状高原为主,平均海拔约为 $1000\sim 1500\text{ m}$ 。鄂尔多斯市正处于鄂尔多斯风

沙高原向黄土高原过渡地带,是中国北方农牧交错带的中心区域。该市气候类型为典型的温带大陆性气候,雨热同期,多年平均气温在 $6.53\sim 8.75\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降水约为 $150\sim 410\text{ mm}$ 。近年来该地区呈现出明显的暖干化趋势,是中国半干旱区一个相对独立的自然地理单元(史培军, 1991)。鄂尔多斯市自然资源富集,煤炭探明储量约占全国的 $1/6$,天然气探明储量约占全国的 $1/3$,羊绒制品产量约占全国的 $1/3$,素有“地下煤海”、“世界羊绒产业中心”等美誉(蒙古军等, 2012)。研究区西北部为沙漠区,东部是农业区,由于历史时期以来的滥垦、滥伐,导致该区荒漠化发生、发展,沙尘暴频繁发生。

2.2 数据来源

本文使用的数据包括:①河流、区县行政界线等来自鄂尔多斯市基础地理信息数据(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>);②土地利用/覆盖数据来源于 Global-Land30 数据集(<http://www.Globallandcover.com/>),该数据是以 Landsat 遥感影像和中国环境减灾卫星(HJ-1)的多光谱影像为主要数据源,在参考大量辅助数据的基础上通过遥感分类获得,空间分辨率为 30 m (Chen et al, 2015)。为便于计算生态系统服务,将土地利用/覆盖类型归并为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地 6 类(图 1)(Liu et al, 2014);③NDVI 数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),是 2000 年和 2010 年的 MODND1D 月合成产品,空间分辨率为 500 m ;④气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.gov.cn/>),包括研究区及其周边的 108 个气象站点 2000 年和 2010 年的气温、降水等信息;⑤土壤数据来源

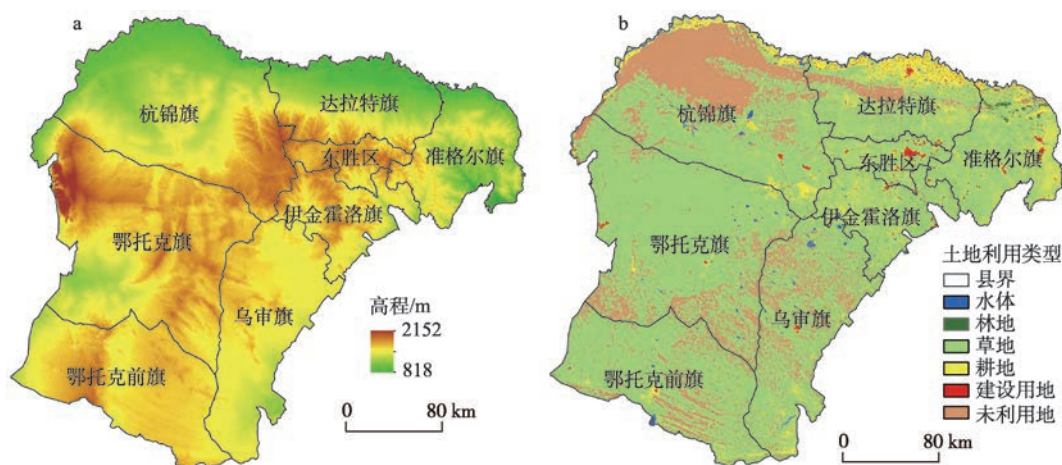


图1 研究区地理位置示意

Fig.1 Location of the study area-Ordos

于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version1.2, HWSD),该数据包含土壤类型、土壤质地、土壤有机碳含量和根系深度等资料,比例为1:100万;⑥DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),为美国航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)共同推出的地球电子地形数据 ASTER GDEMv2,空间分辨率为30 m;⑦社会经济统计数据来源于《内蒙古统计年鉴2011》和《伊克昭盟统计年鉴2001》。将所有空间数据统一为Albers投影,空间分辨率为30 m。

3 研究方法

3.1 生态系统服务测算

3.1.1 食物供给

食物供给是生态系统,特别是农业生态系统重要的供给服务之一。基于土地利用分类,将粮食、油料和蔬菜按照农田面积,肉类和奶类按照草地面积分别计算其单位面积上的食物供给量。由于农作物、畜产品产量与NDVI之间具有显著的线性关系(李军玲等,2012;赵文亮等,2012),本文针对耕地、草地采用全部为正值的NDVI对食物产量统计数据空间化,在此基础上评估研究区食物供给能力,即将粮食产量、肉类与奶类产量按照NDVI值分别分配给耕地、草地栅格,计算公式如下:

$$G_i = \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \times G_{sum} \quad (1)$$

式中: G_i 为第 i 个栅格所分配的粮食产量、肉类与奶类产量; G_{sum} 为食物总产量、肉类与奶类总产量; $NDVI_i$ 表示第 i 个栅格的NDVI; $NDVI_{sum}$ 为研究区耕地或草地的NDVI之和。

3.1.2 碳储存

本文采用碳储存表征生态系统的固碳能力(Tallis et al, 2013)。陆地生态系统碳储量取决于四大碳库,即:地上生物碳(C_{above})、地下生物碳(C_{below})、土壤碳(C_{soil})和死亡有机碳(C_{dead})。具体使用InVEST模型的碳储量模块以各土地利用/植被类型或植被类型为评估单元,以4种碳库的平均碳密度乘以各评估单元的面积来评估区域生态系统碳储量,计算公式如下:

$$C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (2)$$

式中: C_{tot} 为总的碳储量(t/hm^2)。

3.1.3 产水量

本文采用InVEST模型中的产水模块计算鄂尔多斯市的产水量,基本原理如下:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \quad (3)$$

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)。

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^w\right]^{1/w} \quad (4)$$

$$PET(x) = K_c(x) \times ET_o(x) \quad (5)$$

$$w(x) = \frac{AWC(x) \times Z}{P(x)} + 1.25 \quad (6)$$

式中: $PET(x)$ 为栅格单元 x 的潜在蒸散量; $ET_o(x)$ 为参考植被蒸散量; $K_c(x)$ 为作物蒸散发系数; $AWC(x)$ 为植物可利用含水量; $w(x)$ 为经验参数; Z 为Zhang系数(Zhang et al, 2001, 2004)。

3.1.4 土壤保持

本文采用RUSLE模型(修正的通用土壤流失预报方程)估算鄂尔多斯市的土壤保持量(Renard et al, 1997)。基于“地表覆被替换假设”,土壤保持量可表示为潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差,即在没有任何植被覆盖管理与水土保持措施下土壤侵蚀量和当前植被覆盖管理与水土保持措施下土壤侵蚀量的差值,计算公式为:

$$A = R \times K \times LS \times (1 - C \cdot P) \quad (7)$$

式中: A 为实际土壤保持量($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子,采用Wischmeier等(1965)提出的月尺度公式计算; K 为土壤可蚀性因子,参考周平等研究确定 K 值; LS 统称为地形因子,其中 L 为坡长因子,采用Wischmeier和Smith提出的公式计算(Wischmeier et al, 1978), S 为坡度因子,采用McCool等和刘宝元等提出的公式计算(McCool et al, 1987; Liu et al, 2000); C 为植被覆盖管理因子,采用蔡崇法等(2000)建立的覆盖度与 C 值的关系计算, P 为水土保持措施因子。

3.2 生态系统服务变化率度量

生态系统服务变化率可以反映区域生态系统服务的年际变化状况,计算公式如下:

$$Slope = \frac{n \sum_{i=1}^n ia_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n a_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (8)$$

式中: $Slope$ 表示生态系统服务的变化率; a_i 表示 i 年的生态系统服务; n 表示年份。当 $Slope > 0$, 表示某种生态系统服务呈现增加的趋势; 当 $Slope < 0$, 表示某种生态系统服务呈现减少的趋势, 且越趋于 0 表示其变化量越小、越稳定。

3.3 生态系统服务相关分析与热点区识别

为量化鄂尔多斯市食物供给、碳储存、产水量与土壤保持 4 种生态系统服务之间的空间异质性, 计算不同生态系统服务之间的相关系数矩阵, 基于相关分析明晰鄂尔多斯市生态系统服务间的权衡关系 (Raudsepp-Hearne et al, 2010; Turner et al, 2014), 同时在 SPSS 20.0 中对回归系数进行检验。当某对生态系统服务间的相关系数通过了 0.10 水平的显著性检验且该系数为负值, 则该对生态系统服务之间存在显著的权衡关系; 反之, 若通过显著性检验且为正值, 则为显著的协同关系 (Jopke et al, 2015)。

将鄂尔多斯市食物供给、碳储存、产水量与土壤保持 4 种生态系统服务超过当年各自平均值的地区, 视为该种服务的热点区 (刘金龙, 2013)。其中, “一、二、三、四类服务热点区” 对应分别能够提供 1、2、3、4 种超过区域平均值的服务的区域。对 4 种生态系统服务进行极差标准化, 将每个栅格的最大值代表的生态系统服务作为主导服务, 进行主导生态系统服务热点区制图。

4 结果与分析

4.1 生态系统服务时空变化

2000-2010 年, 鄂尔多斯市的食物供给与碳储存空间格局基本不变, 产水量与土壤保持量空间格局变化明显 (图 2)。食物供给量高值区以东北部边缘为主, 西北部地区和南部地区无食物供给能力, 其他大部分地区食物供给量在 $800 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 及以下。2000 年该市土地平均食物供给量为 $99.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2010 年增至 $224.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中, 达拉特旗北部地区和伊金霍洛旗中部地区的食物供给能力提升明显, 与 2004 年达拉特旗的粮食补贴政策的实施密切相关。鄂尔多斯市的碳储存格局为中部高值、北部和南部低值, 其空间分布主要受土地利用类型分布格局影响, 2000、2010 年全市碳储存量分别为 $8.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8.41 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。鄂尔多斯市产水量空间格局主要受降水和蒸散影响, 从整体来看产水量呈现东

高西低的空间格局。由于该区域所在的半干旱区降水年际变化较大, 造成 2010 年产水量高值区范围相较于 2000 年增大明显, 变化区域主要分布在鄂尔多斯市中部地区; 年平均产水量由 153.64 mm 增至 291.90 mm , 增幅明显。土壤保持量的空间分布呈现从东向西递减的变化格局, 东部农业区以耕地和草地为主, 植被覆盖高, 且人工保育效果良好, 土壤保持能力较强; 西部地区海拔较高, 分布有库布齐沙漠, 水土流失较严重, 土壤保持能力较弱。2000、2010 年全市土壤保持量平均值分别为 $47.79 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $59.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 呈现增加趋势。整体而言, 鄂尔多斯市的生态系统服务在 2000-2010 年有所增强。

4.2 不同土地利用类型的生态系统服务对比

重点关注耕地、林地和草地, 探究不同土地利用类型之间的生态系统服务及其相互关系的变化。对 4 种生态系统服务按照土地利用类型进行统计, 得到每种土地利用类型对应的 4 种服务均值。为使不同服务之间有更为直观的对比, 研究通过 Z-Score 标准化进行去量纲处理, 并制作南丁格尔玫瑰图。如图 3 所示, 耕地的食物供给和土壤保持服务最高, 碳储存最低; 林地的产水量最大, 食物供给最小; 草地的碳储存最大, 土壤保持和产水最小。从时间动态来看, 耕地的产水量 2000-2010 年明显减少, 食物供给减少不明显, 土壤保持量明显增大, 碳储存表现为增大但变化量不多; 林地的产水量 2000-2010 年同样表现出增加的趋势, 而其他 3 种服务出现减少; 草地的 4 种服务均表现出增大, 其中产水量变化最为明显, 土壤保持量、产水量、碳储存和食物供给的 Z 值增量分别为 0.0865、0.2019、0.0007 和 0.0126。整体上, 对于耕地和林地, 产水量和土壤保持、碳储存呈现此消彼长的变化方式; 对于草地, 4 种生态系统服务呈现同时增加的变化特征。

4.3 生态系统服务的权衡与协同

4.3.1 关联特征

鄂尔多斯市产水量和土壤保持服务具有明显的协同关系 (表 1)。2000 年, 产水量和土壤保持服务的相关系数为 0.972, 并通过了 0.01 水平上的显著性检验。2010 年, 产水量和土壤保持服务的相关系数为 0.771, 并通过了 0.05 水平上的显著性检验。食物供给与土壤保持服务同样具有明显的协同关系, 2010 年二者相关系数为 0.736, 并通过了 0.05 水平上的显著性检验。

碳储存和土壤保持等生态系统服务之间均未

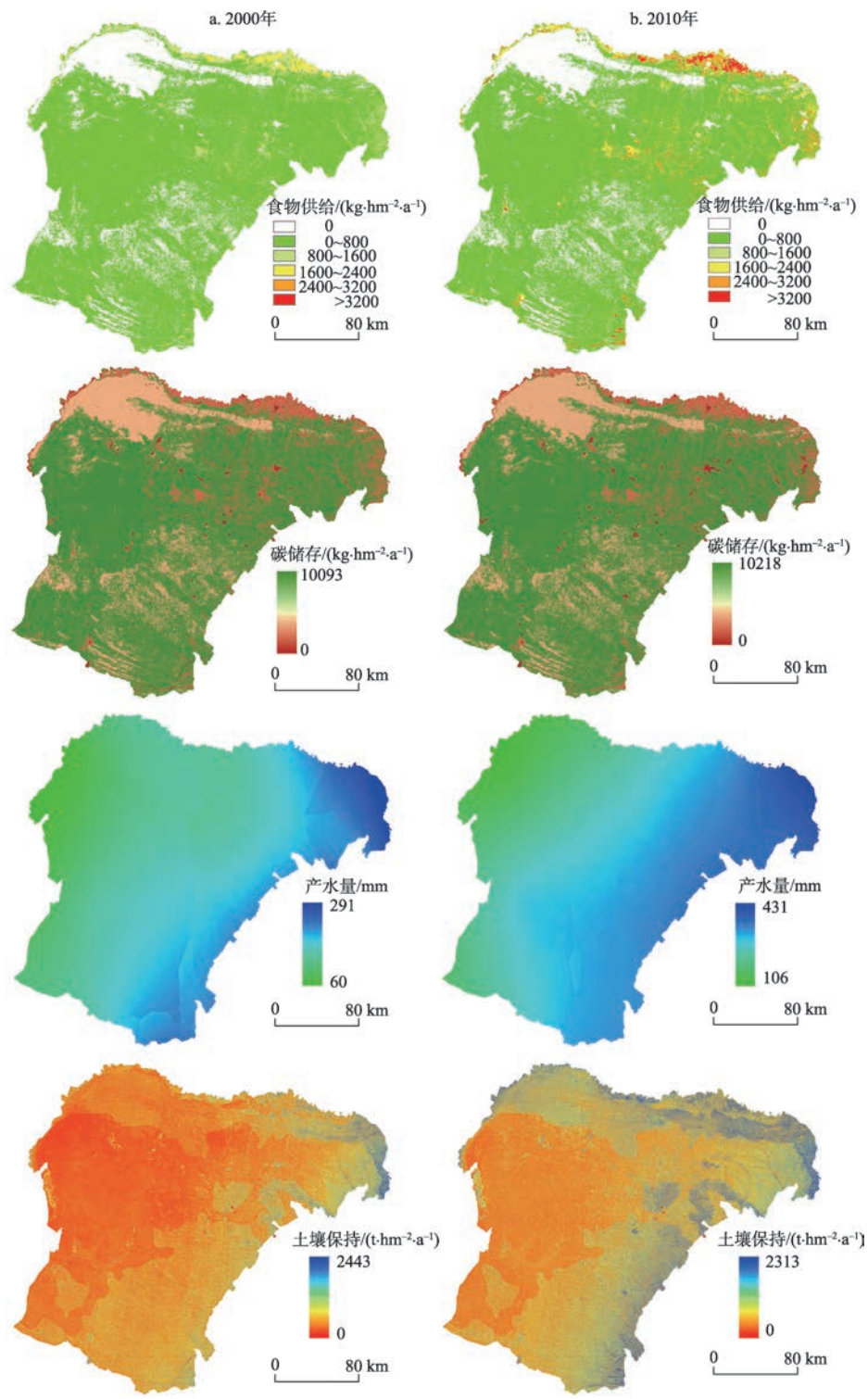


图2 2000-2010年鄂尔多斯市生态系统服务空间分布
Fig.2 Spatial distribution of ecosystem services in Ordos, 2000 and 2010

表现出显著的权衡/协同关系(表1)。其中,碳储存与食物供给的相关系数虽为负值,但是未通过0.05水平上的显著性检验。农田的食物供给能力较强,而碳储存能力较弱;森林等地区的碳储存能力较强,但食物供给能力较弱。对于不同地类,食物供给和碳储存之间表现为权衡关系,但对于整个研究区而言,该权衡关系会被削弱。食物供给和产水量、碳储存与土壤保持、碳储存和产水量的相关系

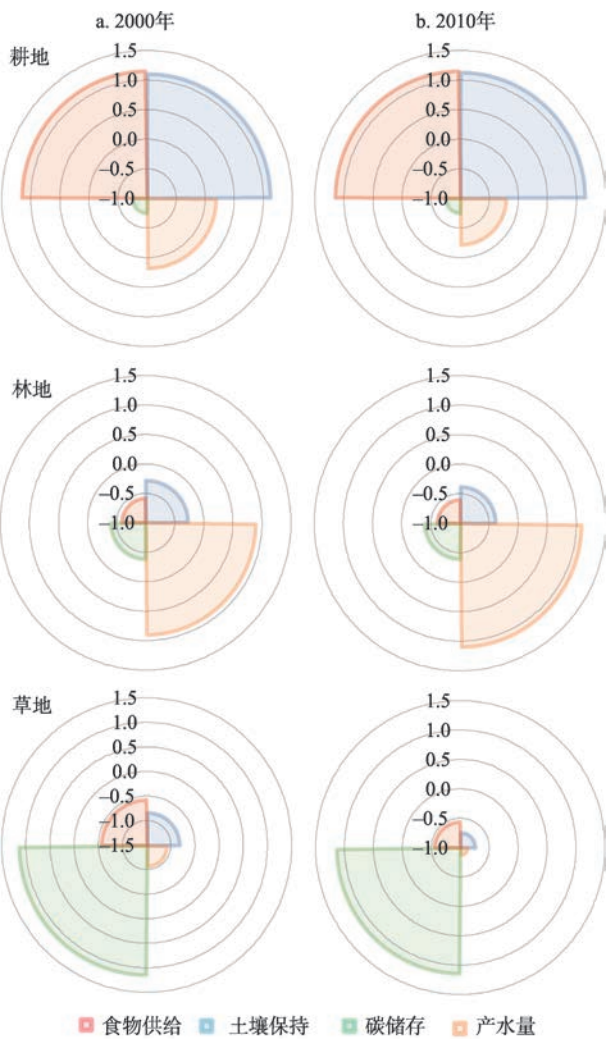


图3 2000-2010年鄂尔多斯市不同土地利用类型
生态系统服务变化

Fig.3 Rose map of ecosystem services in Ordos by land-use
type, 2000 and 2010

数在0.002~0.990之间,均为不显著的正值。食物供给既包含粮食供给也包含畜产品供给,而粮食和畜产品二者具有空间不一致性,这可能是导致食物供给同其他生态系统服务关联不显著的原因。

生态系统服务之间的权衡与协同关系是由生态系统服务之间的相互作用以及共同驱动力引起的,比如降水等因素或由人类活动导致的土地利用变化等。例如,农田具有较强的食物供给能力,但相较于林地和草地,农田的固碳能力较弱(Bennett et al, 2009);植被覆盖的增加,提高了食物供给能力,同时使土壤抗御雨水冲蚀能力提高,即增强土壤保持服务能力;植被覆盖增强也使得其蒸腾耗水的能力提高,但鄂尔多斯市2000-2010年平均降水量大幅提高,使得降水成为控制土壤保持服务和产水服务的主导因子,致使土壤保持服务和产水服务呈现协同关系。

4.3.2 时间变化

2000-2010年,鄂尔多斯市的食物供给和碳储存2种生态系统服务整体上呈现下降特征。土壤保持服务变化率呈现出东北部和西南部降低、西北部和东南部升高的特点(图4)。土壤保持服务改善地区集中分布在杭锦旗和乌审旗,土壤保持服务退化地区则以鄂托克前旗和准格尔旗为主。鄂尔多斯市的产水量则呈现出整个地区增加的态势,其中,鄂托克旗西部、达拉特旗、东胜区及伊金霍洛旗东部地区增加最为明显(图4)。

土壤保持服务增加同产水量增加在大部分区域(73.94%)相一致,表现为明显的协同关系。产水量与土壤保持、碳储存在部分区域也呈现相反的变化趋势,这些区域主要位于伊金霍洛旗、杭锦旗和达拉特旗的耕地,以及周边的林地和草地,其产水量增长而土壤保持、碳储存服务却有所下降。土壤保持服务、碳储存和食物供给在鄂尔多斯市的林地以及市域东北部、西南部的草地范围内呈现同减的趋势,整体表现为协同关系。不同地区生态系统服务之间的变化具有明显的非同步性,表明地域差异对生态系统服务变化的重要影响。

4.3.3 热点区识别

表1 2000、2010年鄂尔多斯市生态系统服务相关系数

Tab.1 Correlation coefficients among different ecosystem services in Ordos, 2000 and 2010

	食物供给		碳储存		产水量		土壤保持	
	2000年	2010年	2000年	2010年	2000年	2010年	2000年	2010年
食物供给	1.000	1.000	-0.584	-0.512	0.409	0.596	0.505	0.736*
碳储存	—	—	1.000	1.000	0.990	0.183	0.002	0.386
产水量	—	—	—	—	1.000	1.000	0.972**	0.771*
土壤保持	—	—	—	—	—	—	1.000	1.000

注:*表示0.05水平上显著,**表示0.01水平上显著。

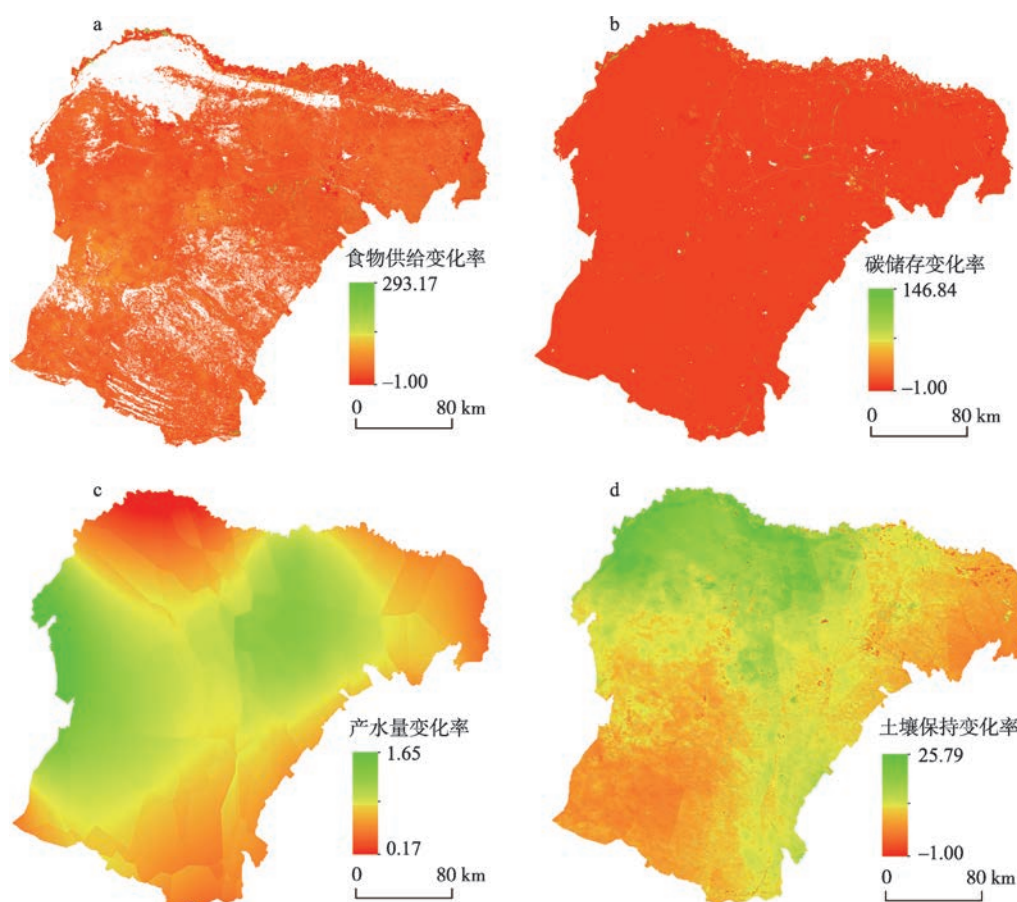


图4 2000-2010年鄂尔多斯市生态系统服务变化率

Fig.4 Change rate of ecosystem services in Ordos, 2000 and 2010

按照鄂尔多斯市土地总面积的百分比计算,2000、2010年不存在不能提供生态系统服务的区域,仅能提供2种生态系统服务的区域面积占比分别为0.50%和0.76%,能提供3种服务的区域面积占比分别为17.22%和17.37%,能提供全部服务的区域面积占比分别为82.28%和81.87%。在多重生态系统服务的供给区中,耕地、草地和林地为主要土地利用类型。总体而言,2000、2010年鄂尔多斯市中部地区多重服务供给能力强,可提供土壤保持、食物供给、产水量和碳储存4种生态系统服务。西北部地区和南部地区,由于分布着大量的未利用地,不具备供给食物的能力,仅能提供土壤保持、产水量和碳储存3种服务。而东胜区和准格尔旗境内建成区面积较大,多重服务供给能力较弱,部分地区仅能提供产水量和碳储存两种服务。

由多重服务热点区统计结果可知(图5),2000、2010年三类服务热点区分别约占鄂尔多斯市土地

总面积的21%和23%,二类服务热点区分别约占31%和38%,一类服务热点区分别约占40%和33%。2000-2010年,二类服务热点区的面积有显著增长,提供生态系统服务能力较弱的土地面积大幅减少,反映鄂尔多斯市生态环境的不断改善。从空间分异来看,杭锦旗的西北部地区分布着大面积的未利用地,提供生态系统服务能力较弱;鄂托克前旗和鄂托克旗的大部分地区以碳储存为主要热点生态系统服务;包括乌审旗、伊金霍洛旗、准格尔旗的鄂尔多斯市东部地区为三类服务热点区,以土壤保持、碳储存和产水为主要的生态系统服务类型。总体来看,鄂尔多斯市的多重服务热点区大多土壤条件优良、植被覆盖较好,因而具有较强的土壤保持、碳储存和产水能力。

主导生态系统服务热点区的分布格局展现出明显的空间异质性(图6),但2000-2010年的空间格局变化不大。其中,碳储存服务主导的热点区主要

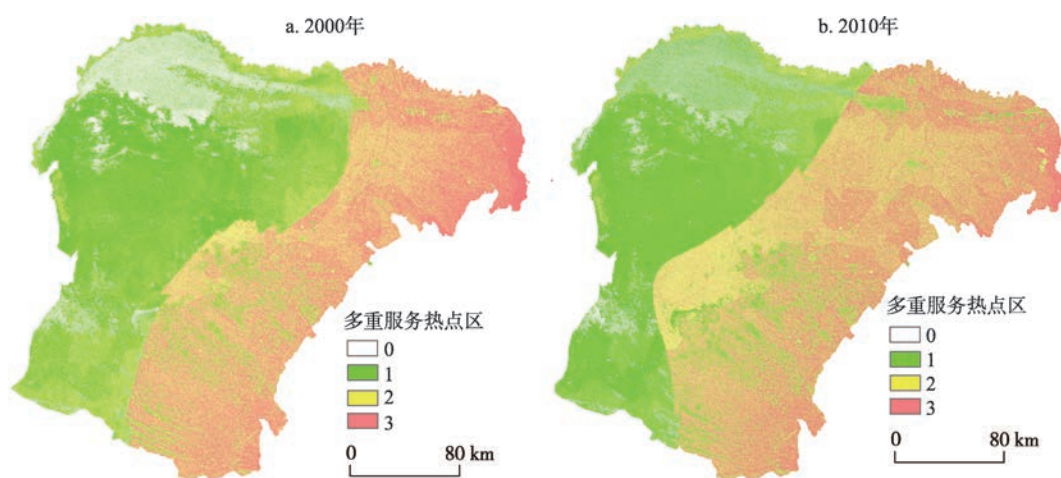


图5 2000-2010年鄂尔多斯市多重生态系统服务热点区

Fig.5 Spatial distribution of hotspots of multiple ecosystem services in Ordos, 2000 and 2010

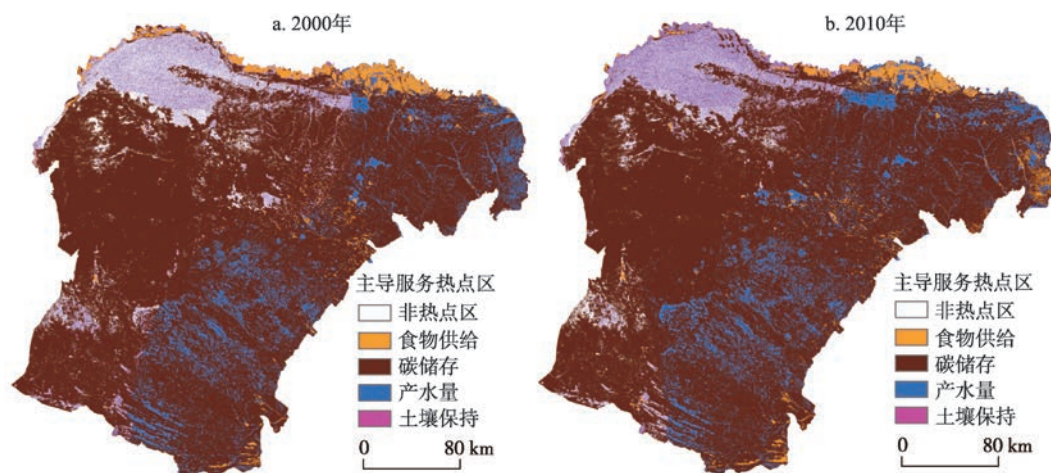


图6 2000-2010年鄂尔多斯市主导生态系统服务热点区

Fig.6 Spatial distribution of hotspots of primary ecosystem services in Ordos, 2000 and 2010

分布在鄂尔多斯市中部和南部地区;土壤保持服务主导热点区主要以杭锦旗、乌审旗为主;食物供给服务主导热点区范围较小,集中分布在杭锦旗和达拉特旗的北部边缘、杭锦旗和伊金霍洛旗交界处以及准格尔旗的东部边缘;产水服务主导的热点区则集中分布在乌审旗的中、北部地区和达拉特旗的中部地区。4种主导服务热点区占研究区生态系统服务热点区总面积的比例在2000、2010年分别为:碳储存(73.53%和73.59%),食物供给(2.76%和2.74%),土壤保持(10.56%和10.34%),产水量(13.15%和13.33%)。碳储存主导服务热点区面积最大,而食物供给主导服务的热点区面积最小。

5 结论与讨论

研究生态系统服务及其相互关系变化对于干旱半干旱地区可持续发展具有重要意义。针对鄂尔多斯市的研究表明:①生态系统服务有所增强。2000-2010年鄂尔多斯市的年平均食物供给量增加 $124.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,碳储存量增加 $0.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,产水量增加 138.26 mm ,土壤保持量增加 $11.25 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$;②不同土地利用类型的生态系统服务对比结果表明,耕地、林地的产水量和土壤保持、碳储存呈现此消彼长的变化方式,草地4种生态系统服务则同时增加;③空间相关分析表明,鄂尔多斯市的产水量和土壤保持服务表现出相互增益的协同关系,食物供给与土壤

保持服务同样具有明显的协同关系,而食物供给和碳储存之间存在此消彼长的空间权衡,符合调节服务和供给服务的权衡认知;④热点区分析表明,在乌审旗、伊金霍洛旗、准格尔旗等鄂尔多斯市的东部地区,存在多重生态系统服务供给的热点区,并以水土保持、碳储存和产水为主要的服务类型。

然而,本文中有关生态系统服务权衡与协同关系的成因尚有待进一步深入研究,尤其是不同研究结果的相互验证。例如,研究表明,在陕西省北部实施的退耕还林还草政策明显提高了区域碳储存服务和水土保持服务,但降低了产水量(Jia et al, 2014)。本文研究结果与其结论不同的原因可能是:产水量计算方法的不同以及鄂尔多斯市和陕西省年平均降水量的差异。水土保持和植被现存的地上生物量密切相关,鄂尔多斯市牧业养殖技术发展迅速,同时人工草地大面积分布,使得水土保持服务与碳储存、产水之间的关系不同于自然植被区域。此外,干旱半干旱地区的生态系统服务权衡关系具有明显的尺度效应(孙泽祥等, 2016),不同尺度上生态系统服务间的权衡关系存在明显差异。因此,要全面了解干旱半干旱地区的生态系统服务权衡与协同关系,有必要强调生态系统服务相互关系的多尺度关联。

参考文献(References)

- 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 2000. 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, 14(2): 19-24. [Cai C F, Ding S W, Shi Z H, et al. 2000. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 14(2): 19-24.]
- 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 2016. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架[J]. 地理研究, 35(6): 1005-1016. [Dai E F, Wang X L, Zhu J J, et al. 2016. Methods, tools and research framework of ecosystem service trade-offs[J]. Geographical Research, 35(6): 1005-1016.]
- 方创琳, 徐建华. 2001. 西北干旱区生态重建与人地系统优化的宏观背景及理论基础[J]. 地理科学进展, 20(1): 21-28. [Fang C L, Xu J H. 2001. Macroscopic background and theoretical basis on ecological reconstruction and man land system intergration in Northwest arid area of China [J]. Progress in Geography, 20(1): 21-28.]
- 李军玲, 郭其乐, 彭记永. 2012. 基于MODIS数据的河南省冬小麦产量遥感估算模型[J]. 生态环境学报, 21(10): 1665-1669. [Li J L, Guo Q L, Peng J Y. 2012. Remote sensing estimation model of Henan Province winter wheat yield based on MODIS data[J]. Ecology and Environment Sciences, 21(10): 1665-1669.]
- 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 等. 2012. 生态系统服务竞争与协同研究进展[J]. 生态学报, 32(16): 5219-5229. [Li P, Jiang L G, Feng Z M, et al. 2012. Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services: An overview[J]. Acta Ecologica Sinica, 32(16): 5219-5229.]
- 刘金龙. 2013. 生态系统服务的模拟与时空权衡: 以京津冀地区为例[D]. 北京: 北京大学. [Liu J L. 2013. Simulation and temporal-spatial tradeoffs of ecosystem services: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region [D]. Beijing, China: Peking University.]
- 蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 等. 2012. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J]. 生态学报, 32(21): 6755-6766. [Meng J J, Zhu L K, Yang Q, et al. 2012. Building ecological security pattern based on land use: A case study of Ordos, Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 32(21): 6755-6766.]
- 史培军. 1991. 地理环境演变研究的理论与实践: 鄂尔多斯地区晚第四纪以来地理环境演变研究[M]. 北京: 科学出版社. [Shi P J. 1991. Dili huanjing yanbian yanjiu de lilun yu shijian: Erdos diqu wandisiji yilai dili huanjing yanbian yanjiu[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 等. 2016. 中国快速城市化干燥地区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, 36(15): 4881-4891. [Sun Z X, Liu Z F, He C Y, et al. 2016. Multi-scale analysis of ecosystem service trade-offs in urbanizing drylands of China: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(15): 4881-4891.]
- 杨莉, 甄霖, 潘影, 等. 2012. 生态系统服务供给—消费研究: 黄河流域案例[J]. 干旱区资源与环境, 26(3): 131-138. [Yang L, Zhen L, Pan Y, et al. 2012. Ecosystem services supply and consumption: A case in Yellow River Watershed, China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 26(3): 131-138.]
- 赵文亮, 贺振, 贺俊平, 等. 2012. 基于MODIS-NDVI的河南省冬小麦产量遥感估测[J]. 地理研究, 31(12): 2310-2320. [Zhao W L, He Z, He J P, et al. 2012. Remote sensing estimation for winter wheat yield in Henan based on the MODIS-NDVI data[J]. Geographical Research, 31(12): 2310-2320.]
- 甄霖, 刘雪林, 李芬, 等. 2010. 脆弱生态区生态系统服务消费与生态补偿研究: 进展与挑战[J]. 资源科学, 32(5): 797-803. [Zhen L, Liu X L, Li F, et al. 2010. Consumption of ecosystem services and eco-compensation mechanism

- in ecological sensitive regions: Progress and challenges[J]. *Resources Science*, 32(5): 797-803.]
- Barbier E B, Koch E W, Silliman B R, et al. 2008. Coastal ecosystem-based management with nonlinear ecological functions and values[J]. *Science*, 319: 321-323.
- Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. *Ecology Letters*, 12(12): 1394-1404.
- Brauman K A, Daily G C, Duarte T K E, et al. 2007. The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services[J]. *Annual Review of Environmental and Resources*, 32: 67-98.
- Chen J, Chen J, Liao A P, et al. 2015. Global land cover mapping at 30m resolution: A pok-based operational approach [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 7-27.
- Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 387: 253-260.
- Daily G C, Myers J P, Reichert J, et al. 1997. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*[M]. 4th ed. Washington, DC: Island Press.
- Dymond J R, Ausseil A G, Ekanayake J C, et al. 2012. Tradeoffs between soil, water, and carbon: A national scale analysis from New Zealand[J]. *Journal of Environmental Management*, 95(1): 124-131.
- Fu B J, Zhang L W, Xu Z H, et al. 2015. Ecosystem services in changing land use[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 15 (4): 833-843.
- Jia X Q, Fu B J, Feng X M, et al. 2014. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China[J]. *Ecological Indicators*, 43: 103-113.
- Jopke C, Kreyling J, Maes J, et al. 2015. Interactions among ecosystem services across Europe: Bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns[J]. *Ecological Indicators*, 49: 46-52.
- Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. 2000. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 64(5): 1759-1763.
- Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. 2014. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 24(2): 195-210.
- MA. 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*[M]. Washington, DC: Island Press.
- McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. 1987. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation [J]. *Transactions of the American Society of Association Executives*, 30(5): 1387-1396.
- Qiu J X, Turner M G. 2013. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(29): 12149-12154.
- Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. 2010. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(11): 5242-5247.
- Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. 1997. *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*[M]. Washington, DC: Agricultural Handbook.
- Rodríguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, et al. 2006. Trade-offs across space, time, and ecosystem services[J]. *Ecology and Society*, 11(1): 709-723.
- Schroback P, Adamson D, Quiggin J. 2011. Turning water into carbon: Carbon sequestration and water flow in the Murray-Darling Basin[J]. *Environmental and Resource Economics*, 49(1): 23-45.
- Tallis H, Kareiva P, Marvier M, et al. 2008. An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105 (28): 9457-9464.
- Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, et al. 2013. *InVEST 2.6.0 user's guide*[M]. Stanford, CA: The Natural Capital Project: 24-49, 233-250.
- Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, et al. 2014. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape[J]. *Landscape and Urban Planning*, 125: 89-104.
- Wischmeier W H, Smith D D. 1965. *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation*[M]. Washington, DC: Agricultural Handbook.
- Wischmeier W H, Smith D D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*[M]. Washington, DC: Agricultural Handbook.
- Wu J G. 2013. *Landscape sustainability science: Ecosystem*

- services and human well-being in changing landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 28(6): 999-1023.
- Yahdjian L, Sala O E, Havstad K M. 2015. Rangeland ecosystem services: Shifting focus from supply to reconciling supply and demand[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(1): 44-51.
- Zhang L, Dawes W R, Walker G R. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. *Water Resource Research*, 37(3): 701-708.
- Zhang L, Hickel K, Dawes W R, et al. 2004. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration[J]. *Water Resources Research*, 40(2): W02502.

Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City

WU Wenhuan¹, PENG Jian^{1,2*}, LIU Yanxu², HU Yi'na²

(1. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 2. Ministry of Education Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The city of Ordos is in the central part of the ecotone between agriculture and animal husbandry in northern China, and the rapid economic development brings great pressure to the ecological environment. Ecosystem services and their inter-related changes in Ordos have great significance for the sustainable development of ecosystems in this semi-arid area. This study calculated the four key ecosystem services of food supply, carbon storage, water production, and soil conservation in Ordos in 2000 and 2010, and used the relevant analysis to explore the tradeoffs and synergies between the four services at the 30 m × 30 m grid scale and introduced the rose map. The relationship between the ecosystem services of different land-use types was analyzed. The results show that there is a synergistic relationship between water production and soil conservation, a synergistic relationship between food supply and soil conservation, a tradeoff relationship between soil conservation and food supply, and a tradeoff relationship between food supply and carbon storage. The eastern agricultural area of Ordos contains most of the hotspots of multiple ecosystem services. The production of water reduced as soil conservation and carbon storage improved in cultivated land and woodland, while in the grassland the four ecosystem services increased simultaneously.

Key words: ecosystem services; tradeoffs and synergies; hotspots; Ordos City