

中国土地利用程度与生态系统服务强度脱钩分析

陈万旭^{1,2}, 曾杰^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430078;

2. 中国地质大学(武汉)空间规划与人地系统模拟研究中心, 武汉 430078)

摘要: 科学探索土地利用程度与生态系统服务强度之间的脱钩关系,可以有效揭示土地利用变化对生态系统的干扰程度,为土地利用政策制定和生态系统保护提供科学依据。但是,以往研究缺乏对中国县域尺度土地利用程度和生态系统服务强度之间脱钩关系的具体研究。为了弥补这一不足,结合2000—2015年间中国土地利用现状遥感监测数据以及植被覆盖度指数,采用生态系统服务强度和土地利用程度测度方法,分别测度了2000—2015年间中国县域尺度生态系统服务强度和土地利用程度的时空格局特征,并且借助脱钩分析理论框架探测二者之间的脱钩关系。研究结果表明:(1)研究期间中国生态系统服务强度呈现出显著的空间异质性,东南地区生态系统服务强度显著高于西北地区;平原地区、城市群地区以及大城市周边地区生态系统服务强度显著低于山地丘陵地区。(2)研究期间中国土地利用程度持续增加,东南地区土地利用程度明显高于西北地区,东南地区土地利用程度分布“高中有低”,西北地区土地利用程度分布“低中有高”。(3)脱钩分析结果表明强脱钩和扩张负脱钩是当前中国土地利用程度和生态系统服务强度二者的主要关系类型,前者是两难的窘境,后者是双赢的模式。研究发现土地利用不同阶段对生态系统服务强度的干扰呈现显著差异,结果可以为土地利用与生态系统管理政策的制定提供科学指导。

关键词: 生态系统服务强度;土地利用程度;时空关系;脱钩分析;中国

土地利用/土地覆被变化已经公认为是全球变化的重要组成部分和主要原因之一,并且将在全球变化中持续扮演重要角色^[1,2]。20世纪90年代以来,中国城镇化的快速推进,加快了土地利用转型的进程,同时也严重干扰了生态系统服务的可持续供给,引发了诸如土地退化和生物多样性丧失等一系列的问题,进而给中国生态文明建设和可持续发展带来了巨大挑战。当前,日益严峻的人地矛盾迫使人类必须有效协调土地利用与生态系统之间的关系。如何科学评估土地利用变化对生态系统的干扰程度,有效缓解生态系统恶化态势,并且制定有效的生态系统保护策略,是当前中国政府决策者和城市规划者讨论的热点话题。在此背景下,科学探索土地利用变化和生态系统服务之间的脱钩关系,对于制定有效的生态系统保护以及土地利用政策意义重大。

生态系统服务研究主要集中在生态系统服务评价、权衡及影响因素分析、供需分析、情景预测和优化调控等方面^[3-6],以往研究基于价值量法、物质法和能值法等对生态系统服务在不同时空尺度做了大量的实证研究^[7-9],但是基于不同研究尺度和不同研究目

收稿日期: 2020-04-03; 修订日期: 2020-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001187, 41701629); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUGW170206)

作者简介: 陈万旭(1989-),男,河南信阳人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为资源环境、区域经济。

E-mail: cugcwx@sina.com

通讯作者: 曾杰(1985-),男,湖北钟祥人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为城镇化、城乡土地利用与社会—生态系统。E-mail: zengjie@cug.edu.cn

标生态系统服务评价结果难以形成对比,更难以纳入国家尺度生态系统保护和土地利用决策的制定^[10]。其中,价值量评估方法主要通过对不同生态系统类型进行价值量系数赋值来测算生态系统服务的使用价值和非使用价值^[11],基于专家知识的生态系统价值当量系数的确定缺乏对生态系统服务空间异质性考虑,导致生态系统服务评估存在主观性和不确定性^[12]。而基于物质量和能值的生态系统服务评估,由于评估数据获取的难度较大^[8],往往也难于进行大尺度、长时间序列的对比分析。鉴于此,本文引入了生态系统服务强度来测度全国县域尺度生态系统服务供给能力,用以丰富中国生态系统服务测度方法^[10,12]。生态系统服务强度可以用来表征自然和生态系统为人类提供生态产品和支持功能、调节功能等其他生态利益的强度^[12,13]。生态系统服务强度这一概念的引入有效地把各种生态系统功能融为一体,为生态系统服务测度提供了新的视角和方法。

以往研究从土地利用数量变化^[13,14]、土地利用方式变化^[15]、土地利用格局变化^[16]、土地利用综合动态度^[17,18]和土地利用程度^[19,20]等方面,全面探测了土地利用变化对生态系统服务的影响。具体来说,以往土地利用程度和生态系统服务之间关系的研究多局限于对局部区域的探讨,由于研究方法和研究尺度的不同,土地利用程度和生态系统服务的关系呈现较大差异。有些研究认为土地利用程度增加会导致生态系统服务恶化,然而一些研究却得出了相反的结论^[21,22],土地利用程度究竟如何影响生态系统服务还未有定论。土地利用程度对生态服务的影响并不是简单的线性关系,现有研究通常采用弹性分析方法来探测两者之间的关系,鲜见有采用脱钩分析方法对全国县域单元土地利用程度和生态系统服务之间关系进行全面研究^[19,23]。脱钩分析方法可以用来分析两者或者多个要素之间的响应关系,可以有效地揭示土地利用变化对生态系统服务的影响程度。基于此,本文采用脱钩分析探索中国县域单元土地利用程度和生态系统服务强度之间的脱钩关系,有效解释土地利用变化对生态系统服务的干扰,以期为中国土地利用政策的制定和生态系统的保护提供科学借鉴。

本文结合2000—2015年间中国土地利用现状遥感监测数据以及植被覆盖度指数,采用生态系统服务强度和土地利用程度测度方法,分别测度2000—2015年间中国县域尺度土地利用程度和生态系统服务强度的时空分布格局特征,并且借助脱钩分析理论框架探测二者之间的脱钩关系。具体从如下三个方面对以往研究进行补充和完善:(1)基于生态系统服务强度和土地利用程度测度方法,测度2000—2015年间中国县域单元生态系统服务强度和土地利用程度时空分布特征;(2)基于生态系统服务强度和生态系统服务强度变化空间匹配关系,探索中国生态系统服务强度的空间演变特征;(3)基于脱钩分析方法分析土地利用程度变化对生态系统服务变化的影响。本文拟解决以下三个问题:(1)生态系统服务强度和土地利用程度时空分布特征是什么?(2)生态系统服务强度和土地利用程度的脱钩关系是什么?(3)如何支持相关政策应用?

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源

2000年、2005年、2010年和2015年中国土地利用遥感监测数来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),分辨率是1000 m×1000 m,是目前中国精度最高的土地利用遥感监测数据产品,已经在国家土地资源调查、水文、生态研究中发挥着重要作用^[24,25]。其中2000年、2005年和2010年数据生产制作是以各期Landsat TM/ETM

遥感影像为主要数据源, 2015年数据在2010年数据基础上更新, 基于Landsat 8 遥感影像, 通过人工目视解译生成, 数据精度高于90%^[24,25]。土地利用类型包括7个一级类型, 包括耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地和湿地。行政边界数据源于中国国家地理信息中心 (NGCC) (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。2000年、2005年、2010年和2015年中国1 km分辨率植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 空间分布数据集同样来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)^[26]。由于数据缺失, 故不包括港澳台地区。

1.2 研究方法

1.2.1 生态系统服务强度

基于Costanza等^[13]提出的生态系统服务价值测度理论框架, 谢高地等^[14]在700多位生态学者专家知识的基础上, 结合中国生态系统特点, 对中国生态系统的分类以及当量表进行了修正。但是谢高地等^[14]提出的当量因子是一个全国的生态系统服务价值当量均值, 缺乏对中国生态系统服务价值空间异质性表达。以往研究基于生物量对生态系统服务价值进行了矫正, 但是生物量和生态系统功能并不是完全的成正相关, 尤其是在水域面积广阔的地区^[27,28]。例如水域生态系统含有的生物量是很少的, 但是水域生态系统在水净化、废物处理和气候调节等方面发挥着重要的作用。陈万旭等^[29]提出了基于耕地上的生物量进行矫正的方法来弥补基于区域生物量进行校正产生的偏差。基于此, 本文对以往研究进行改进, 认为基于耕地上的生物量对谢高地等^[14]提出的生态服务价值的当量表进行校正更为合理。基于式 (1) 和式 (2) 每个县域单元生态系统服务价值校正系数进行估算, 计算公式如下:

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (1)$$

$$F_k = \frac{f_k}{\bar{f}} \quad (2)$$

式中: F_k 是第 k 个县域单元生态系统服务价值校正系数; f_k 是第 k 个县域单元耕地上的生物量均值; \bar{f} 是全国耕地上生物量均值。由于西北地区部分县区没有耕地, 本文通过取周边县区的均值获得校正系数。

基于谢高地等^[14]提出的当量表进行标准化处理 [式 (3)], 每种地类的生态系统功能标准化后的均值 [式 (4)] 作为该地类单位面积的生态系统服务强度值 (表1)。由于土地利用类型和生态系统类型之间没有一对一的匹配, 根据以往研究, 选择每种土地利用类型最接近的生态系统服务强度值进行赋值^[18,30], 根据式 (5) 对中国县域生态系统服务强度进行测度, 计算公式如下:

$$w_{ij} = \left(\frac{I_{ij} - I_{ij-\min}}{I_{ij-\max} - I_{ij-\min}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$w_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} / m \quad (4)$$

$$ESI_k = \sum_{i=1}^n w_i S_{ik} F_k / \sum_{i=1}^n S_{ik} \quad (5)$$

式中: w_{ij} 是 i 地类标准化后的 j 生态系统服务价值当量因子, 其得分在0~100之间; $I_{ij-\max}$ 和 $I_{ij-\min}$ 分别是 i 地类提供 j 生态系统功能类型的最大值和最小值; w_i 是第 i 类土地利用类型生态系统服务强度; m 是生态系统功能类型数量 ($m=1, 2, 3, \dots, 9$); ESI 是生态系统服务强

表1 生态系统服务价值当量加权系数

Table 1 Standardized equivalent weighting factor of ecosystem services value per hectare for each land type								
一级类型	二级类型	林地	草地	耕地	湿地	水域	未利用地	建设用地
供给服务	食物生产	33.00	43.00	100.00	36.00	53.00	2.00	0.00
	原材料生产	100.00	12.00	13.00	8.00	12.00	1.34	0.00
调节服务	气体调节	100.00	35.00	17.00	56.00	12.00	1.39	0.00
	气候调节	30.00	12.00	7.00	100.00	15.00	0.96	0.00
	水文调节	22.00	8.00	4.00	72.00	100.00	0.37	0.00
	废物处理	12.00	9.00	9.00	97.00	100.00	1.75	0.00
支持服务	保持土壤	100.00	56.00	37.00	50.00	10.00	4.23	0.00
	维持生物多样性	100.00	41.00	23.00	82.00	76.00	8.87	0.00
文化服务	提供美学景观	44.00	19.00	4.00	100.00	95.00	5.12	0.00
	w	60.08	26.00	23.69	66.64	52.52	2.89	0.00

度； S_i 是第*i*土类的面积（ hm^2 ）； n 是区域土地利用类型种类（个）。

1.2.2 土地利用程度

土地利用程度LUI可以用来反映土地利用的深度和广度，进而揭示在人类社会系统干扰下土地资源自然综合体自然平衡保持状态^[31]。为定量评估土地利用程度，刘纪远^[31]提出了依据土地自然综合体在社会因素影响下自然平衡的保持状态，将土地利用程度分为四级，对每种土地利用类型进行土地利用程度赋值（ D_i ）。例如，城镇、居民点和其他建设用地等建设用地定义为土地利用程度的最高级，赋值为4；而处于原始状态、自然发展而未受到人类因素干涉的用地方式定义为最低级，赋值为0，从而给出土地利用程度的定量表达。李士成等^[20]对刘纪远^[31]提出的不同地类的利用程度赋值进行细化。例如，人为干扰和投入产出较少的未利用地被赋值为0，具有强烈人为干扰和投入产出的城市建设用地被赋值为10，农村居民点赋值为8，耕地赋值为7，实现了土地利用程度更加准确的评估，具体赋值参考Li等^[20]的研究。计算公式如下：

$$LUI = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \times D_i$$

(6)

式中： D_i 是第*i*地类土地利用程度赋值。

1.2.3 脱钩分析

脱钩分析方法已经广泛应用于农业、交通、能源、建设用扩张和碳排放等领域，但是鲜有研究基于脱钩方法测度土地利用程度和生态系统服务两者之间的关系，本文采用脱钩分析方法对两者之间的关系进行研究。根据Tapio^[32]和OECD^[33]对脱钩理论进行的拓展和丰富，把脱钩理论框架分为八种逻辑可能性，具体包括强脱钩、强负脱钩、弱脱钩、扩张连接、扩张负脱钩、衰退脱钩、衰退连接和弱负脱钩类型。参考以往研究，把1.2和0.8作为脱钩弹性临界值，通过将生态系统服务强度变化率（ $\% \Delta ESI$ ）除以土地利用程度变化率（ $\% \Delta LUI$ ）来构建脱钩指数^[34]。其中， $DI > 1.2$ ， $\% \Delta ESI > 0$ ， $\% \Delta LUI > 0$ ，扩张负脱钩； $0.8 < DI < 1.2$ ， $\% \Delta ESI > 0$ ， $\% \Delta LUI > 0$ ，扩张连接； $0 < DI < 0.8$ ， $\% \Delta ESI > 0$ ， $\% \Delta LUI > 0$ ，弱脱钩； $DI < 0$ ， $\% \Delta ESI < 0$ ， $\% \Delta LUI > 0$ ，强脱钩； $DI > 1.2$ ， $\% \Delta ESI < 0$ ， $\% \Delta LUI < 0$ ，衰退脱钩； $0.8 < DI < 1.2$ ， $\% \Delta ESI < 0$ ， $\% \Delta LUI < 0$ ，衰退连接； $0 < DI < 0.8$ ， $\% \Delta ESI < 0$ ， $\% \Delta LUI < 0$ ，弱负脱钩； $DI < 0$ ， $\% \Delta ESI > 0$ ， $\% \Delta LUI < 0$ ，强负脱钩。具体每个类型的意义参考文献 [32]，计算公式如下：

$$DI_{t_2-t_1} = \frac{\% \Delta ESI}{\% \Delta LUI} = \frac{(ESI_{t_2} - ESI_{t_1})/ESI_{t_1}}{(LUI_{t_2} - LUI_{t_1})/LUI_{t_1}} \quad (7)$$

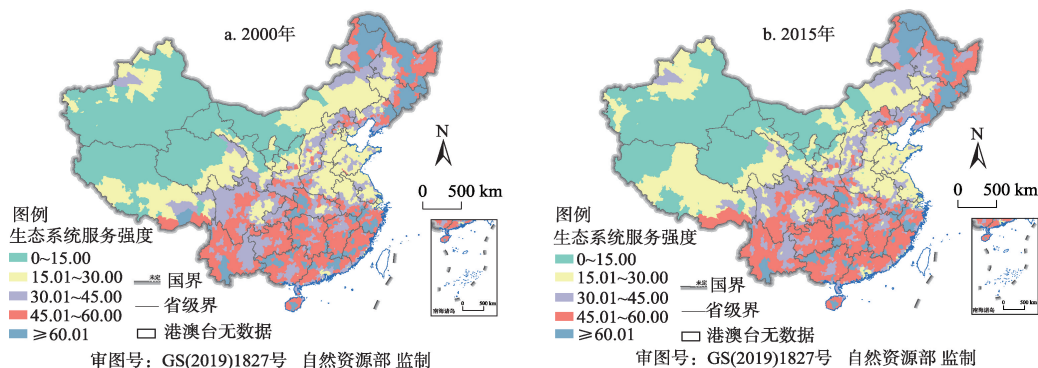
式中： $DI_{t_2-t_1}$ 代表 t_1 年到 t_2 年的脱钩指数； ESI_{t_1} 和 ESI_{t_2} 分别代表 t_1 年和 t_2 年生态系统服务强度指数； LUI_{t_1} 和 LUI_{t_2} 分别代表 t_1 年和 t_2 年土地利用程度指数。

2 结果分析

2.1 2000—2015年中国生态系统服务强度时空分布

2000—2015年中国生态系统服务强度空间分布格局基本保持稳定，总体来看秦岭—淮河以南地区生态系统服务强度明显优于以北地区，东部季风区生态系统服务强度高于青藏高寒区和西北干旱区（图1）。其中西北经济区（新疆、西藏、青海、甘肃和宁夏）和黄河中游经济区的部分省区包括内蒙古和山西的部分地区生态系统服务强度相对较低；东部季风区的黄淮海平原地区（包括北京、河北、天津、山东、江苏以及河南东部以及安徽北部）、四川盆地、长江中游经济区（湖北、湖南和江西）、长三角地区（上海、江苏南部地区、安徽东部以及浙江北部县区）和珠三角地区（广东）以及东北地区沿哈大线由南向北分布的辽宁沿海经济带、辽中南城市群、沈阳经济区和哈长城市群地区生态系统服务强度同样较低。西北经济区和黄河中游经济区生态系统服务强度较低的原因主要是自然条件恶劣、降雨不足、气候干燥、沙漠广布、生态环境脆弱、资源环境承载力总体偏低；东部季风区生态系统服务强度低值区是社会经济发展导致的，这些地区自然条件优越，交通便利，经济聚集效应强，对人口的拉动作用明显，社会经济发展和人口集聚是这些地区生态系统服务强度偏低的主要原因。

为了进一步分析生态系统服务强度及其空间匹配状况，基于中国县域生态系统服务强度指数空间分布状态，划分0~25、25~50、 ≥ 50 三个水平区（低水平、中水平和高水平），然后基于生态系统服务强度变化情况，划分 < -0.50 、 $-0.50 \sim 0$ 、 $0 \sim 0.25$ 、 $0.25 \sim 0.75$ 、 ≥ 0.75 五个水平区（高速恶化、低速恶化、低速改善、中速改善和高速改善），二者进行组合可以得到15种分区组合类型（图2）。低水平并且不断恶化的区域主要分布在中国西北地区的部分县区，如青海、西藏、新疆和内蒙古的部分县区；低水平并且不断改善的区域主要分布在黄土高原的部分地区以及新疆的部分县区；中水平不断恶化的区域主要分布在中国二三阶梯的过度县区、四川盆地周边县区以及华北平原地区和东南地



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 2000年和2015年中国县域生态系统服务强度空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of ecosystem services intensity at the county level in China in 2000 and 2015

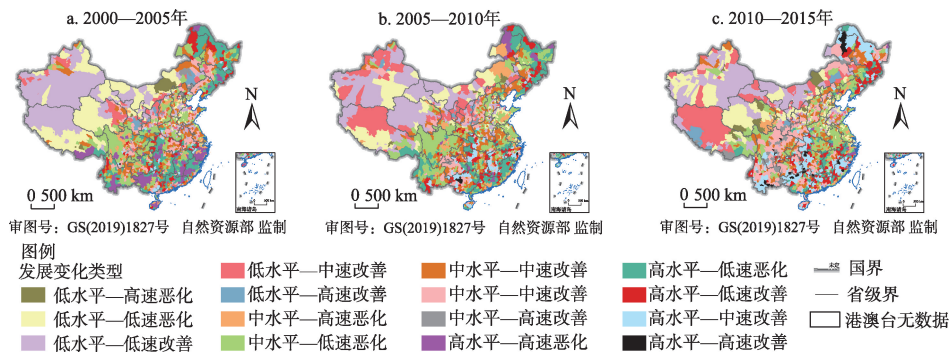


图2 2000—2015年中国县域生态系统服务强度水平发展变化类型

Fig. 2 Development types of ecosystem services intensity at the county level in China from 2000 to 2015

区一些大的城市和城市群周边地区（长江中游城市群、长三角城市群和珠三角城市群）；高水平改善区域主要集中于大兴安岭地区、长白山脉、太行山脉、巫山、雪峰山和武夷山等山脉地区；高水平恶化区域主要分布在这些山脉的周边地区。

2.2 2000—2015年中国土地利用程度时空分布

从时间尺度来看，2000—2015年间中国土地利用程度呈现持续增加的趋势，从2000年的1.97增加到2015年的2.01。随着中国经济和人口的迅速增加，人类活动对土地利用自然综合体的影响愈加强烈。从空间尺度来看，东部季风区土地利用程度显著高于西北干旱区和青藏高寒区，总体保持着“东南高、西北低”这一空间格局未有显著变化，东南地区土地利用程度分布“高中有低”，西北地区土地利用程度“低中有高”。东部季风区土地利用程度低值区主要分布在山地和丘陵地区，而土地利用程度高值区主要分布在黄淮海平原、长江三角洲、四川盆地、长江中游地区、珠江三角洲和东北地区的中南部地区；西北干旱区和青藏高寒区土地利用程度高值区主要分布在西宁、拉萨和乌鲁木齐等省会城市（图3）。

2.3 2000—2015年中国土地利用程度和生态系统服务强度的脱钩分析

为了充分揭示生态系统服务强度和土地利用程度之间的关系，首先对生态系统服务强度和土地利用程度两者之间的散点图进行分析（图4）。从2000—2015年四个时间点散点图可以看出，土地利用程度和生态系统服务强度之间并不是简单的线性关系，生态系统服务强度随着土地利用程度的增加而不断增加，到达阈值后，随着土地利用程度的增加而不

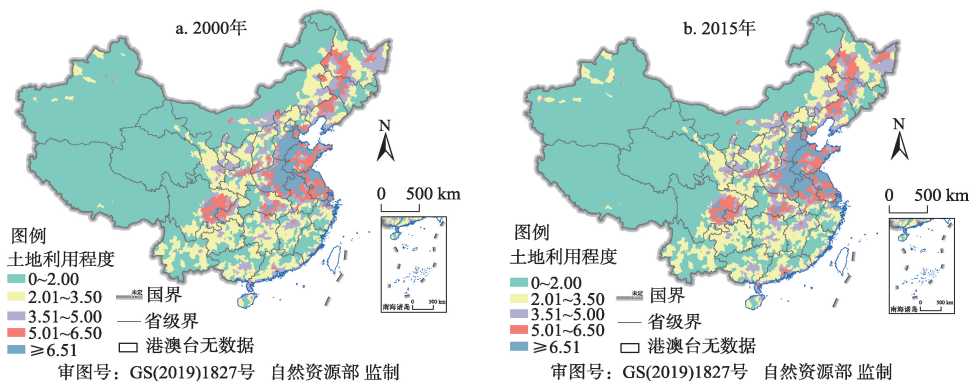


图3 2000年和2015年中国县域单元土地利用程度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of land use intensity at the county level in China in 2000 and 2015

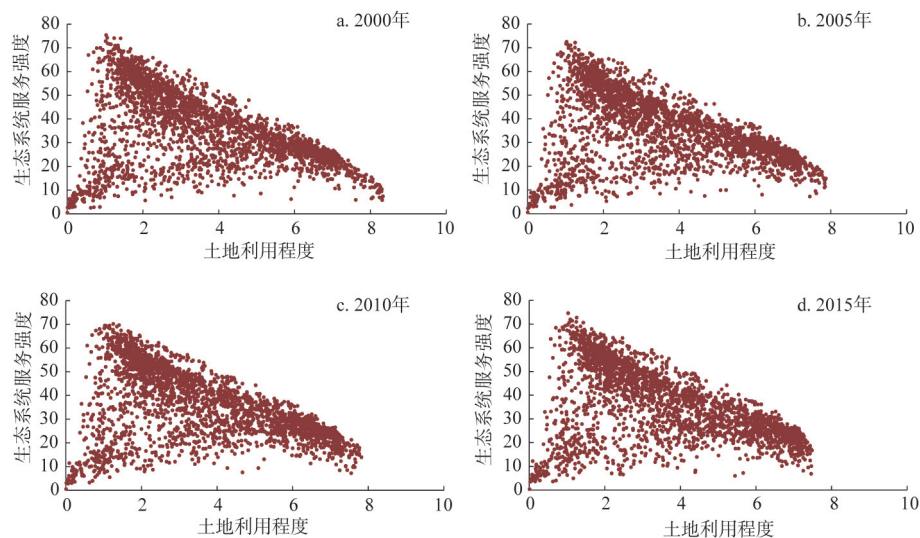


图4 2000—2015年中国生态系统服务强度和土地利用程度散点图

Fig. 4 Scatter plot of *ESI* and *LUI* in China from 2000 to 2015

断降低。在土地利用的初级阶段，主要是由未利用地（低生态系统服务供给潜力）转为林地、草地和耕地等土地利用类型（高生态系统服务供给潜力），进而促进整体生态系统服务强度的提升。随着土地利用程度的增加，土地利用类型转型主要发生在林地转为耕地、草地转为耕地、林地转为建设用地、草地转为建设用地等土地利用类型之间，这必然会导致整体生态系统服务强度的降低。生态系统服务强度和土地利用程度之间的皮尔逊相关性分析结果显示：2000年两者之间相关系数为 -0.519 ， $P=0.000$ ；2005年两者之间相关系数为 -0.526 ， $P=0.000$ ；2010年两者之间相关系数为 -0.546 ， $P=0.000$ ；2015年两者之间相关系数为 -0.571 ， $P=0.000$ 。总体上可以看出生态系统服务强度和土地利用程度之间存在负相关关系，但是在局地地区土地利用程度的增加会导致生态系统服务强度的提高。

为了进一步解释中国不同区域生态系统服务强度和土地利用程度之间的关系，对2015年中国东部、中部、西部以及东北地区生态系统服务强度和土地利用程度两者之间的散点图做进一步分析（图5），明显发现：东部地区、中部地区以及东北地区生态系统服务强度和土地利用程度两者之间显示出显著的负相关。其中东部地区土地利用程度增加带来的生态系统服务强度降低最为显著，相反西北地区大部分县区土地利用程度的增加会促进生态系统服务强度的增加，只有少数县区土地利用程度的增加会促进生态系统服务强度的降低。不同分区生态系统服务强度和土地利用程度两者之间的散点图揭示出土地利用程度对生态系统服务强度的影响具有显著区域差异。

基于式（7），得出2000—2005年、2005—2010年和2010—2015年间土地利用程度和生态系统服务强度脱钩指数的空间分布特征（图6）。对不同逻辑类型县域比例进行统计，结果见表2。2000—2005年、2005—2010年和2010—2015年间在八种脱钩类型中，强脱钩类型占比最高，分别为33.68%、36.85%和41.90%，呈现逐渐增加的趋势。强脱钩类型代表土地利用程度的增加会导致生态系统服务强度的降低，这种发展模式处于两难的境地。2000—2005年间强脱钩类型主要分布在浙江、福建、湖南、广西、云南以及东北大部分地区以及中西部的部分地区；2005—2010年间主要分布在山东、江苏、浙江、广东以及内蒙古的东部地区与中西部的部分地区；2010—2015年间主要分布在河南、长

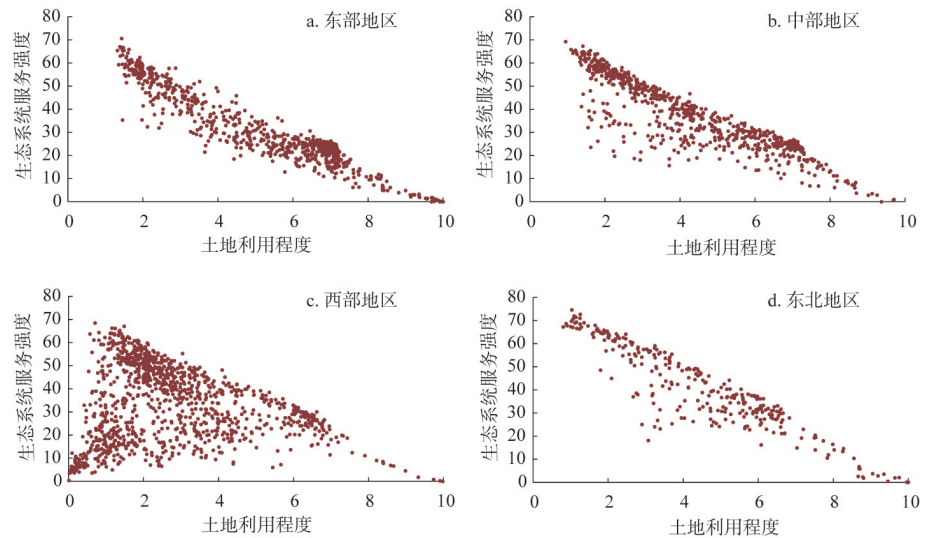


图5 2015年中国不同分区生态系统服务强度和土地利用程度散点图

Fig. 5 Scatter plot *ESI* and *LUI* in different regions of China in 2015

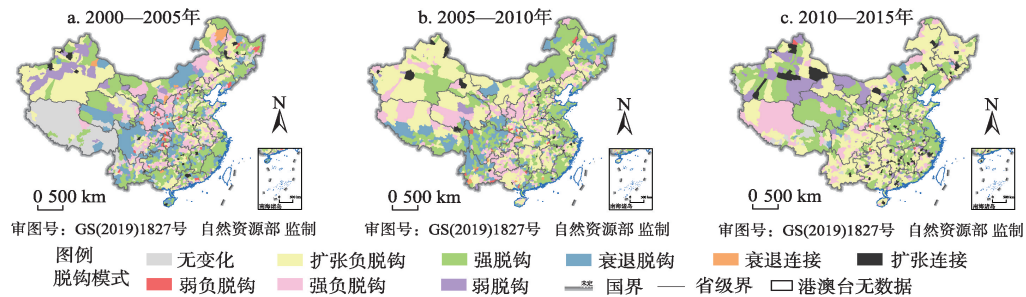


图6 2000—2015年中国县域单元脱钩模式空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of decoupling patterns at the county level in China from 2000 to 2015

江中下游地区、环渤海地区以及中西部的部分地区。其次是扩张负脱钩类型，这种类型在三个研究时段分别占比20.69%、29.86%和35.90%，同样呈现逐渐增加的趋势。扩张负脱钩类型代表土地利用程度的增加会导致生态系统服务强度的增加，而且生态系统服务强度的增加高于土地利用程度的增加，是一种双赢的发展模式。2000—2005年间扩张负脱钩类型离散分布于全国范围；2005—2010年间主要离散分布于中西部地区；2010—2015年间主要分布在西南地区以及东北地区。其次是强负脱钩类型，分别占比为16.58%、15.60%和6.95%，呈现逐渐降低的趋势。强负脱钩类型代表这些地区土地利用程度

表2 脱钩逻辑可能性统计

Table 2 Logical possibilities statistics (%)			
脱钩类别	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年
无变化	9.59	0.25	3.86
扩张负脱钩	20.69	29.86	35.90
扩张连接	1.37	0.84	2.39
弱脱钩	3.76	1.83	5.30
强脱钩	33.68	36.85	41.90
衰退脱钩	12.82	13.66	3.34
衰退连接	0.46	0.42	0.07
弱负脱钩	1.05	0.70	0.28
强负脱钩	16.58	15.60	6.95

降低导致了生态系统服务强度改善,这种类型是一种可持续的发展类型,主要离散分布于中西部地区以及东北地区。衰退脱钩类型同样是一种重要的脱钩逻辑类型,在2000—2005年、2005—2010年和2010—2015年间分别占12.82%、13.66%和3.34%。这种类型的县域单元土地利用程度的降低导致了生态系统服务强度的降低,而且生态系统服务强度的降低程度高于土地利用程度的降低程度,这种类型是不可持续的发展类型。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于生态系统服务强度和土地利用程度测度方法,分析了2000—2015年间中国生态系统服务强度和土地利用程度时空分布特征,结合脱钩理论模型,对土地利用程度变化和生态系统服务强度变化之间的脱钩关系进行了深入研究,结论如下:

(1) 2000—2015年间中国生态系统服务强度空间分布具有显著的空间异质性特征,西北地区生态系统服务强度显著低于东部地区,经济集聚和人口集聚的平原地区生态系统服务强度显著低于山地丘陵地区,可见中国生态系统服务强度的供给潜力空间格局是在自然地理要素和社会经济要素两方面的综合作用下形成的。

(2) 2000—2015年中国土地利用程度逐渐增加,总体保持着“东南高、西北低”这一空间格局未有显著变化,东南地区土地利用程度分布“高中有低”,西北地区土地利用程度“低中有高”。经济集聚区和人口集聚区土地利用程度显著高于山地丘陵地区,自然地理要素始终是限制人类干扰土地利用系统自然平衡保持状态的重要因子。

(3) 土地利用不同阶段对生态系统服务强度的干扰在时间和空间上差异性显著,脱钩分析结果表明土地利用程度的增加会导致生态系统服务强度的增加或者降低。强脱钩和扩张负脱钩是当前中国土地利用程度和生态系统服务强度之间的主要关系类型,前者是两难的窘境,后者是双赢的模式。

3.2 讨论

对比以往研究可以发现土地利用程度和生态系统服务强度空间分布特征,存在相关性又存在分异性,东西相关为主,南北分异为主。其中东西之间的相关是由土地利用的自然属性引起的,而南北之间的分异是由于土地利用的社会属性造成的^[35]。本文中土地利用程度和生态系统服务强度之间的关系和以往研究结果基本一致,总体呈现负向的影响,局部地区会呈现正向的影响^[19]。基于以上研究结果,可以发现不同区域土地利用程度和生态系统服务强度之间脱钩程度具有显著差别。基于此,本文提出差异性管控政策。对于强脱钩类型区域,这种区域处于两难的境地,土地利用活动的增加会导致生态系统服务强度的降低。城镇化和工业化的迅速发展导致土地利用程度的持续增加,土地利用程度的过度增加必然导致生态系统的恶化,协调土地利用程度、社会经济发展和生态系统保护三者之间关系,是促进土地可持续利用和生态系统保护的有效路径。土地利用程度的高低不能说明土地利用是否合理,但是生态系统服务强度可以作为评价土地利用是否合理的一个科学指标^[36]。需要探索土地管理新机制、创新节约集约用地新模式,通过优化整体用地结构和布局,提高土地利用集约度,增加生态用地比例,严格控制建设用地的增量,形成倒逼机制,缓解土地利用程度增加过程中生态系统的恶化。对于扩张负脱钩这一双赢类型区,在保护生态环境的前提下,加快经济发展,充分释放土地红利和生态红利,形成生态环境保护与经济发展,实现良性互动协调发展局面。强负脱钩类型是一种可持续的发展类型,需要针对区域具体情况,促进低效废弃地再利用,增加

投入和产出,提高土地利用效率。衰退脱钩类型同样是不可持续的发展类型,生态系统服务和土地利用程度同时降低,而且生态系统服务强度的降低程度高于土地利用程度的降低程度。对于这种类型亟需优化土地利用结构和布局,缓解当前土地利用低效性、无序性以及粗放性,缓解生态系统恶化局面。

本文基于脱钩分析方法,探讨了土地利用程度和生态系统服务强度之间的关系,研究结果表明:当前中国土地利用程度对生态系统服务强度有负向影响也有正向影响,负向影响大于正向影响,研究结果可为土地资源可持续利用、土地利用规划以及生态系统保护提供科学指导。局限于全国县域尺度数据的可得性,本文引入生态系统服务强度测度了中国生态系统服务供给能力,并且结合植被覆盖度进行了矫正,但是对生态系统本身的多样性和环境条件的多样性带来的生态系统服务类型和强度空间差异性仍考虑不足。另外,仅仅讨论了生态系统服务强度和土地利用程度之间的关系,没有讨论生态系统服务强度和土地利用变化速度(土地利用综合动态度)、土地利用结构(土地利用多样性指数)以及自然要素(海拔、气候、地形等)、社会经济要素(人口密度和经济发展)等之间的脱钩关系。未来的研究可以综合考虑土地利用因子、自然要素和社会经济因子与生态系统服务强度之间的脱钩关系,此外,中国土地利用政策、生态系统政策以及区域发展战略的实施形成的全球范围内远程耦合(Telecoupling)和近程耦合(Local coupling)系统对中国生态系统服务强度的影响,同样是未来的研究重点方向^[37]。

参考文献(References):

- [1] MOONEY H A, DURAIAPPAH A, LARIGAUDERIE A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs. *PNAS*, 2013, 110: 3665-3672.
- [2] Global Land Project (GLP). Science plan and implementation strategy. IGBP Report No. 53 and IHDP Report No. 19, 2005.
- [3] 谢余初,张素欣,林冰,等.基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 217-229. [XIE Y C, ZHANG S X, LIN B, et al. Spatial zoning for land ecological consolidation in Guangxi based on the ecosystem services supply and demand. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 217-229.]
- [4] SUN X, LU Z M, LI F, et al. Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs to support the supply of multiple ecosystem services in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 117-129.
- [5] 马琳,刘浩,彭建,等.生态系统服务供给和需求研究进展. *地理学报*, 2017, 72(7): 1277-1289. [MA L, LIU H, PENG J, et al. A review of ecosystem services supply and demand. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1277-1289.]
- [6] 傅伯杰,于丹丹.生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9. [FU B J, YU D D. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services. *Resources Science*, 2016, 38(1): 1-9.]
- [7] ZHANG Y, LIU Y F, ZHANG Y, et al. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: A case study in Wuhan, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638: 780-790.
- [8] OUYANG Z Y, ZHENG H, XIAO Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [9] ULGIATI S, BROWN M T. Emergy and ecosystem complexity. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(1): 310-321.
- [10] KOSCHKE L, FÜRST C, FRANK S, et al. A multi-criteria approach for an integrated land-cover-based assessment of ecosystem services provision to support landscape planning. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 54-66.
- [11] 赵景柱,肖寒,吴刚.生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 290-292. [ZHAO J Z, XIAO H, WU G. Comparison analysis on physical and value assessment methods for ecosystems services. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 290-292.]
- [12] HU X S, HONG W, QIU R Z, et al. Geographic variations of ecosystem service intensity in Fuzhou city, China. *Science of the Total Environment*, 2015, 512-513: 215-226.
- [13] COSTANZA R, DARGE R, DEGROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.

- [14] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919. [XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.]
- [15] CARPENTER S R, MOONEY H A, AGARD J, et al. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. PNAS, 2009, 106(5): 1305-1312.
- [16] FU B J, CHEN L D, MA K M, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in Northern Shaanxi, China. Catena, 2000, 39(1): 69-78.
- [17] SONG W, DENG X Z. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China. Science of the Total Environment, 2017, 576: 705-719.
- [18] 陈万旭, 李江凤, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析. 自然资源学报. 2019, 34(2): 325-337. [CHEN W X, LI J F, ZHU L J. Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the Middle Yangtze River Region. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 325-337.]
- [19] CHEN W X, CHI G Q, LI J F. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995-2015. Science of the Total Environment, 2019, 669: 459-470.
- [20] LI S C, BING Z L, JIN G. Spatially explicit mapping of soil conservation service in monetary units due to land use/cover change for the Three Gorges Reservoir Area, China. Remote Sensing, 2019, 11(4): 468, <https://doi.org/10.3390/rs11040468>.
- [21] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应. 生态学报, 2013, 33(8): 2565-2576. [HU H B, LIU H Y, HAO J F, et al. Spatio-temporal variation in the value of ecosystem services and its response to land use intensity in an urbanized watershed. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2565-2576.]
- [22] 高莉洁, 石龙宇, 崔胜辉, 等. 厦门岛生态系统服务对土地利用变化的响应. 生态科学, 2009, 28(6): 551-556. [GAO L J, SHI L Y, CUI S H, et al. Response of ecosystem services to land use change in Xiamen Island. Ecological Science, 2009, 28(6): 551-556.]
- [23] 石龙宇, 崔胜辉, 尹锴, 等. 厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响. 地理学报, 2010, 65(6): 708-714. [SHI L Y, CUI S H, YIN K, et al. The impact of land use/cover change on ecosystem service in Xiamen. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(6): 708-714.]
- [24] 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. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(4): 483-494.
- [25] NING J, LIU J Y, KUANG W H, et al. Spatiotemporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(5): 547-562.
- [26] XU X. The Annually Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Spatial Distribution Datasets for China. Beijing: Data Registration and Publishing System of the Resource and Environmental Science Data Center of the Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [27] WANG Y H, DAI E F, YIN L, et al. Land use/land cover change and the effects on ecosystem services in the Hengduan Mountain Region, China. Ecosystem Services, 2018, 34: 55-67.
- [28] LI F, ZHANG S W, YANG J C, et al. Effects of land use change on ecosystem services value in West Jilin since the reform and opening of China. Ecosystem Services, 2018, 31: 12-20.
- [29] CHEN W X, ZHAO H B, LI J F, et al. Land use transitions and the associated impacts on ecosystem services in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt in China based on the geo-informatic Tupu method. Science of the Total Environment, 2019, 70: 134690, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134690.
- [30] CHUAI X W, HUANG X J, WU C Y, et al. Land use and ecosystems services value changes and ecological land management in Coastal Jiangsu, China. Habitat International, 2016, 57: 164-174.
- [31] 刘纪远. 西藏自治区土地利用. 北京: 科学出版社, 1992. [LIU J Y. Land Use in Tibet Autonomous Region. Beijing: Science Press, 1992.]
- [32] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. Transport Policy, 2005, 12(2): 137-151.
- [33] OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development). OECD Environmental Strategy for the First Decade of the 21st Century. Paris: OECD, 2001.
- [34] 陈万旭, 李江凤, 吴昆, 等. 新疆相对资源承载力评估模型构建及其实证分析. 干旱区地理. 2017, 40(2): 453-461. [CHEN W X, LI J F, WU K, et al. Model modification and empirical analysis of the relative carrying capacity of resources in Xinjiang. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 453-461.]

- [35] 高志强, 刘纪远, 庄大方. 中国土地资源生态环境背景与利用程度的关系. 地理学报, 1998, 53(s1): 36-43. [GAO Z Q, LIU J Y, ZHUANG D F. The relation between ecological environmental background and the used degree of land resources in China. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(s1): 36-43.]
- [36] BATEMAN I J, HARWOOD A R, MACE G M, et al. Bringing ecosystem services into economic decision-making: Land use in the United Kingdom. Science, 2013, 341(6141): 45-50.
- [37] CHEN W X, YE X Y, LI J F, et al. Analyzing requisition-compensation balance of farmland policy in China through telecoupling: A case study in the Middle Reaches of Yangtze River Urban Agglomerations. Land Use Policy, 2019, 83: 134-146.

Decoupling analysis of land use intensity and ecosystem services intensity in China

CHEN Wan-xu^{1,2}, ZENG Jie^{1,2}

(1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China; 2. Research Center of Spatial Planning and Human-environmental System Simulation China University of Geosciences, Wuhan 430078, China)

Abstract: Scientific exploration of the decoupling relationship between land use intensity (LUI) and ecosystem services intensity (ESI) can effectively reveal the disturbance of land use change to ecosystem and provide a solid basis for land use policy making and ecosystem protection in China. However, previous studies lacked specific research on the decoupling degree between *LUI* and *ESI* at county scale. To fill these gaps, this study measured the spatiotemporal distribution pattern of *LUI* and *ESI* with methods of ecosystem services intensity and land use intensity based on the remote sensing monitoring data of land use status and the Normalized Difference Vegetation Index in China from 2000 to 2015. The decoupling relationships between them were explored with the help of the decoupling theory analysis framework. The results showed that: (1) There was significant spatial heterogeneity in the *ESI* in China during the study period, and the *ESI* in Southeast China was significantly higher than that in Northwest China. The *ESI* in the plain areas, urban agglomeration areas, and the surrounding areas of large cities were significantly lower than those in the hilly areas. (2) *LUI* in China continued to increase during the study period. *LUI* in Southeast China was significantly higher than that in Northwest China. *LUI* in Southeast China exhibited the features of low-value *LUI* units distributed among high-value *LUI* units, while *LUI* in Northwest China exhibited the features of high-value *LUI* units distributed among low-value *LUI* units. (3) The results of decoupling analysis showed that strong decoupling and expansion negative decoupling were the main relationship types between *LUI* and *ESI* in China. The former was a dilemma mode, and the latter was a win-win mode. The study found that the interference of *LUI* on *ESI* varied greatly in different stages of land use. The results can provide scientific guidance for the policy making of land use and ecosystem management.

Keywords: ecosystem services intensity; land use intensity; spatial relationship; decoupling analysis; China