

黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异

刘晶晶¹, 王 静², 戴建旺³, 翟天林⁴, 李泽慧¹

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;
3. 中国国土勘测规划院, 北京 100035; 4. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

摘要: 在核算黄河流域生态系统服务供给、需求及供需均衡度的基础上, 分析国土空间格局演变与供需均衡度时空变化的共变趋势, 采用相关分析和分位数回归方法测度各类国土空间对均衡度的影响及区域异质性。结果表明: (1) 黄河流域国土空间格局及生态系统服务供需时空差异明显。下游和中上游沿河县域生活生产用地密集分布且 2000—2015 年增幅明显, 生态系统服务供给增加与耕地和林地的分布一致, 需求增加与人口密度和建设用地分布一致。(2) 均衡度的时空变异受到国土空间格局演变的影响。不同均衡度水平下国土空间对均衡度的影响程度不同, 且区域差异显著。(3) 根据对均衡度产生影响的国土空间不同, 不同区域应合理布局用地和发展政策以促进生态系统有效管理。

关键词: 国土空间格局; 生态系统服务供需; 均衡度; 时空变化; 黄河流域

生态系统服务是指人类直接或间接从生态系统功能中获取的产品和服务^[1], 是至关重要的资源环境基础^[2]。随着对生态系统服务认识的深入, 相关研究已经从生态系统服务的类型分类、空间制图、不同服务之间的作用关系及其与人类福祉间的关系等^[2-4], 逐步发展到城镇化和土地利用变化等与生态系统服务的关系以及生态系统服务供需等方面^[5-7]。生态系统服务供给取决于生态系统的自身状况^[6], 其核算主要采用价值量评估和物质量评估以及能值评估等方法^[8,9], 根据评价目的不同选择的评估方法往往有所差异。目前, 国内外学者对生态系统服务需求的定义还未达成一致^[2], 且不同类型生态系统服务需求的量化指标也有所差异。如供给类服务需求可采用实际消耗产品的价值量或物质量表征^[10], 提供非物质收益的文化服务的需求可以通过体验服务的人数来表示^[11], 也有学者在大尺度的分析中采用人口密度和需求区域面积大小等指标来衡量人类需求程度^[12,13]。国内学者多把生态系统服务的需求理解为人对于生态系统服务和商品生产、消费的需求量与偏好, 主要选取社会经济指标^[6,14,15]来表征。

生态系统服务供需关系作为人类活动与生态系统相互作用响应的结果^[7], 影响着区域生态安全和人与自然和谐发展。伴随着城市化进程中生态环境问题的日益严峻和人类对良好人居环境的需求, 人居环境日益成为多学科关注的热点^[16-18]。从人居环境视角来看,

收稿日期: 2020-04-27; 修订日期: 2020-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41871203)

作者简介: 刘晶晶 (1994-), 女, 河南项城人, 博士研究生, 主要从事土地资源可持续利用与优化研究。

E-mail: liujingjing@whu.edu.cn

通讯作者: 王静 (1966-), 女, 浙江天台人, 博士, 教授, 主要从事土地资源可持续利用与生态系统管理研究。

E-mail: wangjing-bnu@bnu.edu.cn

生态系统服务的供需关系反映的是生态系统服务从自然系统流向人类系统的平衡状况,当自然系统的供给与人类系统的需求处在良性循环状态时,生态系统可达到其发展与利用的最佳状态^[3],支撑保障健康和谐、可持续的人居环境。目前,国内外针对生态系统服务供需关系的研究已经取得了丰硕成果,研究方法涵盖问卷调查^[19]、专家经验^[20]、数据空间叠置^[9,13]以及模型计算^[21,22]等,空间尺度上的研究从地区^[23]、流域^[22]到全球尺度^[13]不等,时间尺度上的研究以探讨某一时间点供需空间、数量关系的静态研究为主^[2],时空变异研究仍需丰富。

国土空间是人居环境的空间载体,作为承载人类生存和发展的自然—社会—经济生态系统,不同国土空间提供的生态系统服务类型和数量有所差异,国土空间格局及其变化直接影响区域生态系统提供生态服务的能力^[24]和人类系统的需求,进而影响着区域的生态系统服务供需关系。森林和沼泽等自然地类有着较高的供给能力,城镇和工业用地等人工地类则是人类需求的集中分布地^[20],建设用地比例一定程度上能反映人类消耗生态系统服务的强度^[14]。经济快速发展下的建设用地扩张和土地利用变化带来的生态系统服务需求增加和供给减少^[4],不仅会造成生态系统服务供需失衡,也会进一步使得区域生态环境恶化,降低人类福祉和人居环境质量。同时,生态用地广布且自然资源丰裕的自然保护区虽然生态系统服务供给较高,但作为主体功能区划中的禁止开发区,其所在区域的经济的发展往往受到制度和环境等多重限制,易于陷入“绿色贫困”或“被动式贫困”^[25]。也就是说,要实现生态系统服务供需均衡和人居环境优化,一方面,城镇化过程中要重视空间集聚发展,建设用地不能无序扩张,另一方面,要重视生态保护和经济的协同发展,尤其是生态保护优先的区域,要重视寻找经济可持续发展路径和合理安排用地,摆脱“绿色贫困”。分析国土空间格局对生态系统服务供需均衡关系的影响,不仅能为提高区域生态系统服务可持续能力、优化区域人居环境提供借鉴和依据,也能为国土空间格局优化提供新视角。目前有关国土空间与生态系统服务供需和人居环境关系的研究,多关注于单一用地类型^[26-28]。也有学者从不同尺度探讨了土地资源配置优化和土地利用变化对人居环境和生态系统供给与需求的影响^[20,29,30],采用的方法包括专家判别、相关分析和普通多元线性回归等,但易于忽略样本内部的差异性,无法全面客观地阐释人居环境和生态系统服务供需关系在不同阶段影响因素的多样性。因此,本文采用能够细致刻画条件分布统计特征的分位数回归方法^[31]分析生态系统服务供需关系的影响机理。

黄河流域跨越了我国地势的三大阶梯,自西向东流经我国不同的地理单元,是我国北方主要的经济区域和重要的生态屏障^[32],其国土空间格局和人居环境因不同区段自然地理特征分异而存在显著差异。长期以来人为毁林开荒和陡坡耕种,使得黄河流域生态状况和人居环境的不断恶化,严重制约了黄河流域的可持续发展。本文在核算生态系统服务供给与需求的基础上,分析黄河流域国土空间格局演变与生态系统服务供需均衡度时空变化的共变趋势,采用相关分析、分位数回归分析等方法测度各类国土空间对供需均衡度的影响,并进一步分区域回归以验证其区域差异,探讨黄河流域人居环境优化和生态系统服务可持续能力提高对用地布局的要求,为推动黄河流域高质量发展和生态系统管理提供理论支撑和决策依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

黄河是我国的第二长河,流经青海、甘肃、四川、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东等9个省(自治区),横跨我国三大地势阶梯和东中西三大经济地带^[32],各区段的自然限制和经济基础差异明显。本文参考水利部黄河水利委员会划定的自然流域,以县级区划为基本空间单元确定本文的研究区,具体以2012年县级行政区划为标准,各市的市辖区认定为一个县级单元,确定的研究区范围总面积为120万km²,包括71个地级市的362个县级行政单元,50个国家级自然保护区分布在黄河流域的99个县域。

1.2 数据来源与处理

土地利用相关数据来源于原国土资源部2000年和2015年年度土地利用变更调查以及2009年全国土地利用现状调查;自然保护区空间分布数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>);人口等社会经济数据来源于黄河流域各县统计年鉴;生态系统服务供给指数和需求指数参考王静等^[14,33,34]的研究成果。

1.3 研究方法

1.3.1 黄河流域不同区域划分

为了在认识黄河流域整体情况的同时明晰其局部特殊性,根据黄河流域社会经济沿河发展以及自然保护区广泛分布的特征,在全域基础上划分出沿河县域、自然保护区所在县域、存在自然保护区的沿河县域和其他县域四类区域(图1),并进行具体分析。黄河流域干流及主要支流50 km半径的缓冲区范围内是县域GDP的高值集中区^[35],因此,本文利用缓冲区分析将黄河流域沿河50 km半径范围内的县域划分为沿河县域;根据黄河流域各省建立国家级自然保护区的情况,提取出存在国家级自然保护区的县域;通过空间叠加分析得到沿河县域和自然保护区所在县域的重叠区域;沿河县域和自然保护区所在县域以外的区域为其他县域。从表1可以看出,黄河流域土地利用结构和社会经济在不同区域呈现显著差异。

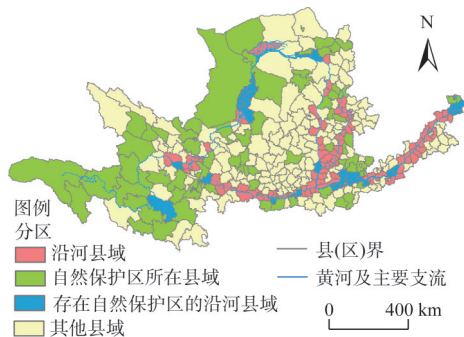


图1 黄河流域不同区域划分

Fig. 1 Different regions of the Yellow River Basin

1.3.2 生态系统服务供给和需求核算

黄河流域县域生态系统服务供给的测度是依据王静等^[33,34]的研究成果,通过综合三大类别和13个子类别的生态系统服务,考虑气候、水文水资源、地形、土壤、生物和社会经济等评估因子计算出的单位面积生态系统服务供给指数。以此为基础,根据2009年土地利用类型分布和单位面积生态系统服务供给指数分布情况,对黄河流域县域单位面积生态系统服务供给指数进行计算,并进一步核算2000年和2015年黄河流域县域生态系统服务供给。

本文在已有研究的基础上将生态系统服务需求定义为人类对于生态系统服务和商品生产、消费的需求量与偏好,黄河流域县域生态系统服务需求的测度参考王静等^[14]和彭建等^[15]的研究成果,以建设用地比例、人口密度和经济密度来表达生态系统服务的需

表1 2015年黄河流域不同区域的土地利用结构和社会经济指标

Table 1 Land use structure and socio-economic indicators in different regions of the Yellow River Basin in 2015 (%)

指标		黄河 流域	沿河 县域	自然保护区 所在县域	存在自然保护区 的沿河县域	其他 县域
生活用地	城镇用地比例	0.98	2.85	0.53	2.00	0.92
	农村居民点比例	2.12	5.42	1.03	3.55	2.33
生产用地	铁路比例	9.44	10.46	6.90	7.32	11.60
	公路比例	6.20	3.73	5.92	4.44	7.24
	采矿用地比例	0.07	0.15	0.04	0.13	0.07
	水浇地比例	6.13	20.48	2.81	10.84	5.41
	旱地比例	9.38	11.72	5.00	6.61	12.89
	果园比例	1.07	2.39	0.28	0.89	1.43
生态用地	河流水面比例	0.50	1.20	0.42	1.23	0.45
	天然草地比例	36.89	11.40	47.11	16.27	33.06
	有林地比例	9.44	10.46	7.36	14.65	11.60
社会经济	人口比例	100	50.01	19.83	6.95	48.79
	GDP比例	100	51.98	22.90	8.11	46.32

求，公式如下：

$$X = D_i \times \lg(P_i) \times \lg(E_i)$$
 (1)

式中： X 表示生态系统服务需求指数； D_i 、 P_i 和 E_i 分别表示建设用地比例（%）、人口密度（人/km²）和经济密度（万元/km²）。

1.3.3 生态系统服务供需均衡度

采用生态系统服务供需均衡度来表征生态系统服务供给与人类对生态产品需求之间的均衡关系，反映二者之间的协调发展状况和生态系统服务可持续能力^[24]，公式如下：

$$C_v = \frac{P \times N}{\sqrt{((P+N)/2)^2}}$$
 (2)

式中： C_v 为生态系统服务供需均衡度指数； P 为生态系统服务供给指数； N 为生态系统服务需求指数。均衡度指数越高供需协调状况越好，0为完全失调，1为优质协调^[24]。

1.3.4 秩相关分析和分位数回归分析

采用能够有效判别两个随机变量在二维或多维空间存在的线性或非线性共变趋势的Spearman秩相关分析，从黄河流域生活用地、生产用地和生态用地中筛选出与生态系统服务供需均衡度存在显著相关关系（ $P \leq 0.5$ ）的变量，包括：农村居民点、城镇用地、铁路、公路、采矿用地、水浇地、旱地、果园、河流水面、天然草地和有林地等的比例。

在相关分析的基础上，以生态系统服务的供需均衡度为被解释变量，以各类用地比例为解释变量，建立分位数回归模型分析各类国土空间对生态系统服务供需均衡度的影响。与普通最小二乘法（OLS）相比，分位数回归不易受离群值影响，能够估计出被解释变量在不同分位数下的回归系数，适用于具有异方差性的模型，能够放松分布假设且估计结果更为稳健^[31]，公式如下：

$$Q_\theta(Y|X) = X' \beta(\theta)$$
 (3)

式中: $Q_{\theta}(Y|X)$ 为给定解释变量 X 的情况下被解释变量 Y 在第 θ 分位点上的值; X 为解释变量的向量, $X=($ 城镇用地比例, 农村居民点比例, 铁路比例, 公路比例, 采矿用地比例, 水浇地比例, 旱地比例, 果园比例, 河流水面比例, 天然草地比例, 有林地比例); $\beta(\theta)$ 表示第 θ 分位点上回归系数向量, 满足以下条件^[31]:

$$\beta(\theta) = \min \left\{ \sum_{i: Y \geq X' \beta} \theta |yY - X' \beta| + \sum_{i: Y < X' \beta(\theta)} (1 - \theta) |Y - X' \beta(\theta)| \right\} \quad (4)$$

随着 θ 的取值由 0 到 1, 可刻画所有 Y 在 X 上的条件分布轨迹, 下文给出 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9 分位点上参数估计结果以探讨各类国土空间在不同生态系统服务供需均衡度水平上对其的影响差异。

对黄河流域不同区域分别回归以验证国土空间对生态系统服务供需均衡度影响的区域异质性, 采用加权最小二乘法估计以解决数据异方差问题。

2 结果分析

2.1 黄河流域国土空间格局时空演变规律

受地形和气候等自然因素的影响, 黄河流域国土空间格局及变化和人口分布呈现明显的空间分异 (图 2、图 3)。草地和耕地是黄河流域主要的用地类型, 耕地主要分布在地形平坦、水热条件较好的下游地区以及汾渭盆地和河套平原等地, 呈现沿河走向的条带状分布特征, 2000—2015 年中游鄂尔多斯高原和下游黄河入海口地区耕地增加明显; 草地广泛分布于西北侧中上游的内蒙古高原、黄土高原和三江源地区, 尤其是自然保护区所在县域, 2000—2015 年黄河流域的草地整体有所减少, 仅中上游地区有零散增加。林地集中分布于南部的秦岭北坡和中条山、黄土高原腹地的子午岭及汾河流域两侧的太行山和吕梁山, 受退耕还林的影响, 2000—2015 年黄土高原和鄂尔多斯高原地区新增林地较多。城镇用地和农村居民点等生活用地与人口密度分布特征一致, 密集分布于下游和中上游沿河地区, 这些地区同时也是 2000—2015 年新增建设用地较多的区域。作为以农业经济为主的区域, 黄河流域的生态状况和农业发展的差别使得流域人口、经济以及生产生活空间的分布, 乃至基础设施建设与产业布局均呈现出明显的空间不平衡^[36], 区域发展重心偏东。

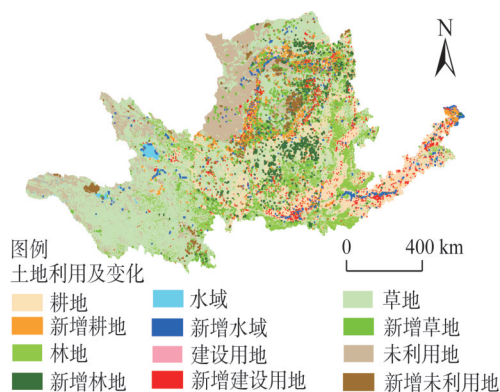


图 2 2000—2015 年黄河流域土地利用及变化
Fig. 2 Land use and changes in the Yellow River Basin from 2000 to 2015

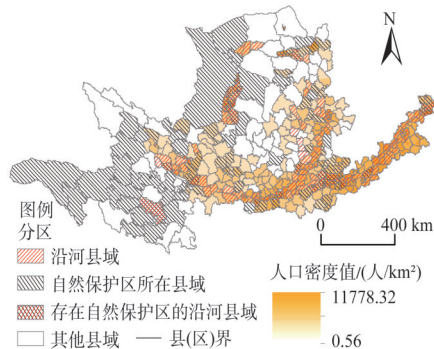


图 3 2015 年黄河流域人口密度
Fig. 3 Population density of the Yellow River Basin in 2015

2.2 黄河流域生态系统服务供给和需求及供需均衡度时空变异

2000—2015年黄河流域生态系统服务的供给指数整体较高且小幅增加,需求指数整体较低且大幅增加,供需均衡度整体水平不高,空间差异显著。从图4可以看出,2000—2015年汾河流域以及沿河县域生态系统服务的供给增加明显,供给指数的增加与耕地和林地的分布及变化呈现一致性,中游非沿河县域尤其是高原地区供给以减少为主。下游地区和中上游沿河县域是需求显著增加的区域,与人口密度和建设用地分布一致。供需均衡度的变化与需求指数变化趋势一致,中上游大部分地区受水源涵养和水土流失问题的影响,自然生态环境脆弱,适宜人类居住的区域较少,且2000—2015年受生态系统服务需求下降的影响均衡度有所下降,下游地区是黄河流域自然条件较为优越的地区,同时其城镇化速度较快,生产生活用地密集,生态系统服务的需求也较高,协调状况较好且随着人类需求的增加有所提升。

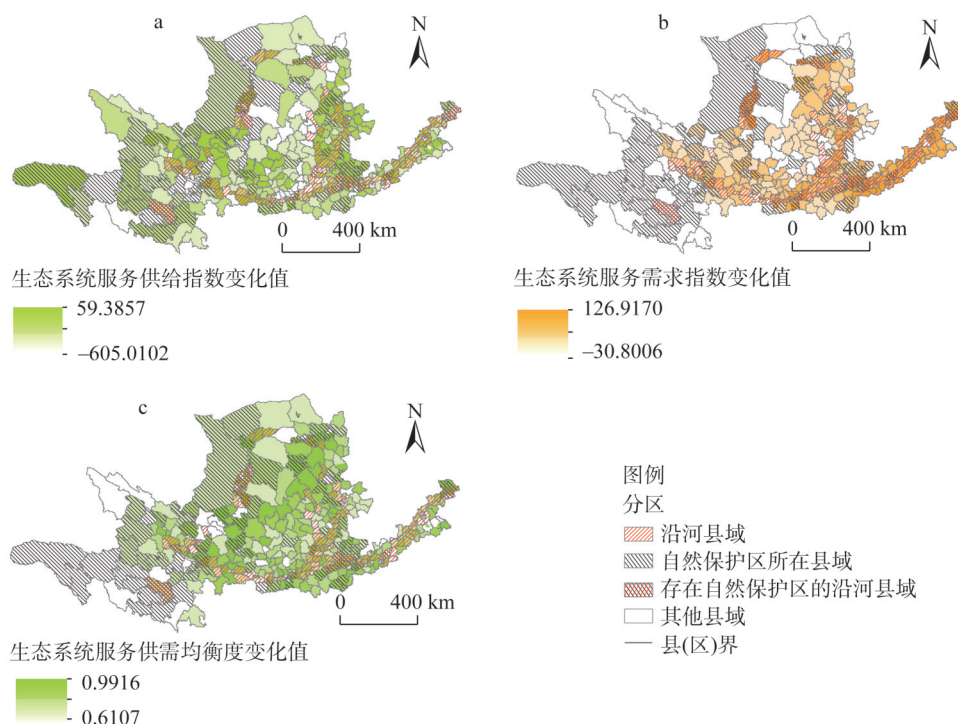


图4 2000—2015年黄河流域生态系统服务供给、需求和均衡度变化

Fig. 4 Changes in ecosystem service supply, demand and coordination degree of the Yellow River Basin from 2000 to 2015

从不同区域来看(表2),自然保护区所在县域生态系统服务供给指数较高,且2000—2015年增幅最大,由2000年的26.88增加到2015年30.85;其需求指数较低且增幅较小,主要是由于自然保护区所在县域受到政策和地理区位等条件的限制^[25],这也是2000—2015年供需均衡度有所增加但依然不高的原因。其他县域的供给指数较高,尤其是2000年,显著高于其他区域,但2000—2015年其他县域是唯一一个供给指数为负增长的区域,且负增长的县域集中在土地利用变化强烈的中部高原地区(图4a);其需求指数在四个区域中增幅最大,由2000年的3.99增至2015年的9.19;由于其供给指数高于流域

表2 2000—2015年黄河流域不同区域的生态系统服务供需

Table 2 Ecosystem service supply and demand in different regions of the Yellow River Basin from 2000 to 2015

区域	供给指数		需求指数		供需均衡度	
	2000年	2015年	2000年	2015年	2000年	2015年
黄河流域	27.76	28.70	3.92	9.18	0.47	0.56
沿河县域	23.95	27.12	4.22	9.33	0.63	0.72
自然保护区所在县域	26.88	30.85	2.89	4.68	0.34	0.45
存在自然保护区的沿河县域	22.87	25.99	3.67	6.84	0.61	0.72
其他县域	29.63	29.51	3.99	9.19	0.44	0.52

水平而需求指数稍低于流域水平，导致其供需均衡度低于流域整体水平。2000—2015年沿河县域和存在自然保护区的沿河县域供给指数均低于流域整体水平，且与其他县域和存在自然保护区的县域相比增幅较小；2000年和2015年沿河县域的需求指数显著高于其他三个区域，存在自然保护区县域的需求指数高于自然保护区所在县域；需求指数较高使得沿河区域的供需均衡度显著高于其他区域，这也说明了黄河流域生态系统服务供需均衡度的提高与需求的提高密切相关。

2.3 黄河流域国土空间格局演变对生态系统服务供需均衡度的影响

在分析黄河流域国土空间格局演变特征和生态系统服务供需均衡度时空变化的基础上，进一步选择2000—2015年增幅显著的城镇用地、农村居民点、天然草地和有林地比例，并根据自然断点法将其比例变化分别划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ共五个级别（级别越高增幅越大），来分析不同用地比例变化下供需均衡度的变化状况（图5）。可以看出，各用地比例变化对均衡度的影响不同，且同一地类在不同变化幅度下的影响也存在差异（表3、表4）。城镇用地比例变化为Ⅰ级和Ⅴ级的区域均衡度均不高，且2000—2015年增幅最大的Ⅴ级区域均衡度有所下降，说明城镇用地增加缓慢和大幅扩张对均衡度均不利。农村居民点比例增幅最大的Ⅴ级区域均衡度较高但增幅较小，2000—2015年作为中等减幅的Ⅱ级区域均衡度有所下降，而减幅最大的Ⅰ级区域却有较大幅度增加，说明农村居民点受其他因素的共同作用对均衡度的影响较为复杂。有林地比例减幅最大的Ⅰ级区域均衡度较高且增幅较大，而有林地比例增幅最大的Ⅴ级区域均衡度有所下降，说明有林地的大幅增加不利于均衡度提高。天然草地比例增加和减幅最大的区域均衡度均不高，减幅较小的地区均衡度较高但增幅小，与其他用地相比，天然草地比例增减对均衡度影响不显著。根据以上分析，可以发现国土空间格局对生态系统服务供需均衡度的影响因受多种因素的共同作用而较为复杂，因此下文选择能够捕捉不同均衡度水平下影响因素的分位数回归来进一步分析2015年各类国土空间与生态系统服务供需均衡度之间的关系，为生态系统服务供需的均衡发展提供更为详实的依据。

2.4 黄河流域国土空间格局与生态系统服务供需均衡度相互关系

从整体回归结果来看，与黄河流域生态系统服务供需均衡度有正相关关系的用地比例包括农村居民点、铁路、采矿用地和果园，这主要是由于黄河流域经济发展水平不高且人类对生态产品的需求相对于生态系统服务供给较低，其均衡度的提升一定程度上需要通过增加生产用地比例进而提高经济发展水平和需求量来实现；旱地、天然草地和有林地与均衡度之间为负相关关系，主要是由于这些用地比例的增加在促进生态

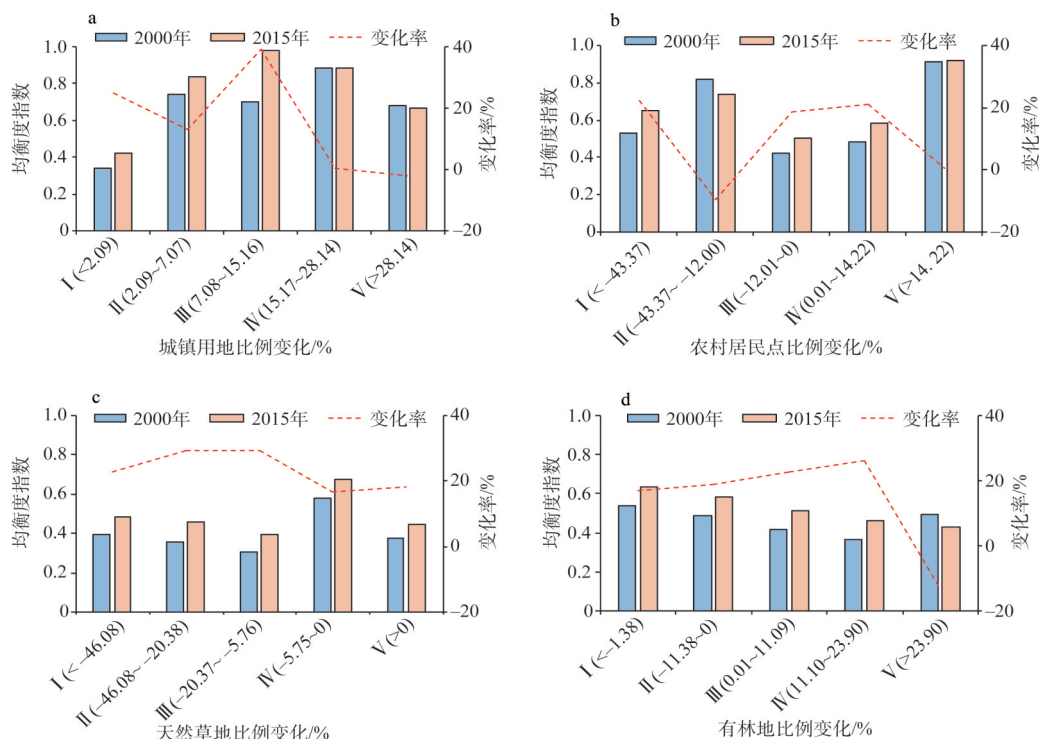


图5 2000—2015年不同用地比例下生态系统服务供需均衡度及其变化率

Fig. 5 The coordination degree and change rate of supply-demand in the Yellow River Basin under different land use change ratios from 2000 to 2015

系统服务供给提高的同时带来的经济效益较小或占用建设用地对经济增长和需求增加不利（表3）。

从分位数回归结果来看，不同分位点处生态系统服务供需均衡度的影响因素呈现明显差异。在中低均衡度区间（分位点 ≤ 0.5 ），农村居民点、铁路、采矿用地、水浇地、旱地和果园比例对均衡度的贡献显著，公路和城镇用地比例对均衡度表现为负面影响（图6），表明在均衡度水平较低时，加强铁路等对外交通建设，发展工业和农业以及促进乡村振兴等提高人类需求的措施对平衡生态系统服务供需有一定作用；同时，采矿用地比例与均衡度之间的关系呈倒U型趋势（图6e），其比例要控制在临界值范围内以防止过度开发对生态环境以及供需均衡度不利。在高均衡度区间（分位点 > 0.5 ），城镇用地比例开始呈现正向影响，可能的原因是随着社会经济发展和均衡度增加带来的城镇化质量的提高，居民生态保护意识变强，保护措施也更完善，有助于促进生态系统服务供给和人类需求的良性循环；农村居民点和铁路比例的正面影响有所下降，可能是由于其对经济的贡献达到饱和后有所降低，此时增加对内交通等基础设施用地可以更好地协调生态系统服务供需和优化人居环境；旱地和水浇地比例的影响变负，果园比例的影响逐渐变小直至在0.9分位点处不显著，主要是由于随着经济发展和产业结构优化，农业对经济增长的贡献下降导致耕地和果园对均衡度的影响也发生转变；天然草地和有林地的负面影响在不断增加，可能的原因是由于其过量占用对经济增长有益的建设用地造成的，且生态退耕等造成的耕地减少短期对经济发展和需求增加不利。

表3 黄河流域不同生态系统服务供需均衡度水平下各类用地比例的分位数估计结果

Table 3 Elasticity coefficients of the proportion of various types of land space under different coordination degrees of supply-demand using quantile regression estimates in the Yellow River Basin

解释变量		OLS	分位点				
			0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
	截距项	-2.22 (-1.09)	-0.569*** (-12.02)	-0.281** (-8.46)	0.0223 (0.79)	0.0868** (2.16)	0.487*** (15.30)
生活用地	城镇用地比例	-0.018 (-0.45)	-0.0811 (-1.09)	-0.0654 (-1.63)	-0.124*** (-3.22)	0.0868** (2.16)	0.257*** (5.10)
	农村居民点比例	0.298*** (5.01)	0.595*** (5.44)	0.416*** (7.05)	0.429*** (7.55)	0.422*** (7.13)	0.409*** (5.52)
生产用地	铁路比例	0.111*** (3.21)	0.175*** (2.74)	0.111*** (3.23)	0.129*** (-0.35)	0.0600* (1.74)	0.0137 (0.32)
	公路比例	-0.077 (-1.65)	-0.225*** (-2.62)	-0.0341 (-0.74)	0.224*** (5.02)	0.239*** (5.16)	0.319*** (5.49)
	采矿用地比例	0.197*** (7.26)	0.151*** (3.04)	0.360*** (13.39)	0.400*** (15.46)	0.310*** (11.50)	0.163*** (4.84)
	水浇地比例	0.088 (1.58)	0.245** (2.40)	0.280*** (5.07)	0.137** (2.57)	-0.0159 (-0.29)	-0.108 (-1.56)
	旱地比例	-0.125*** (-3.28)	0.0694 (0.99)	0.0869** (2.31)	0.0279 (0.77)	-0.0690* (-1.83)	-0.133*** (-2.81)
	果园比例	0.108*** (4.08)	0.138*** (2.83)	0.128*** (4.89)	0.111*** (4.38)	0.0740*** (2.82)	0.0409 (1.24)
	生态用地						
生态用地	河流水面比例	0.014 (0.49)	-0.137** (-2.57)	0.0465 (1.62)	0.0710** (2.57)	0.0457 (1.59)	0.0260 (0.72)
	天然草地比例	-0.481*** (-13.58)	-0.188*** (-2.89)	-0.201*** (-5.72)	-0.242*** (-7.15)	-0.364*** (-10.34)	-0.459*** (-10.43)
	有林地比例	-0.255*** (-8.23)	-0.0760 (-1.22)	-0.0858*** (-2.79)	-0.121*** (-4.10)	-0.192*** (-8.07)	-0.254*** (-12.16)

注：*、**、***分别表示10%、5%、1%的显著性水平，括号内为t检验结果，下同。

表4 黄河流域各区域生态系统服务供需均衡度与各类用地比例回归结果

Table 4 Regression results of the coordination degree of supply-demand, and the proportion of various types of land space in different regions of the Yellow River Basin

解释变量		沿河县域	自然保护区所在县域	存在自然保护区的沿河县域	其他县域
R^2		0.4556	0.7763	0.8550	0.5787
生活用地	城镇用地比例	-0.286***	0.289***	0.528*	-0.022
	农村居民点比例	0.060	0.365***	1.121***	0.142**
生产用地	铁路比例	-0.315***	-0.213***	0.157	0
	公路比例	0.345***	-0.136	0.110	-0.298***
	采矿用地比例	0.145*	-0.068	-0.526	0.019
	水浇地比例	0.3500	-0.021	-0.525	0.246**
	旱地比例	-0.321*	-0.115	-0.609**	-0.097
	果园比例	0.182	0.138	0.276	0.178**
生态用地	河流水面比例	0.192***	0.154***	-0.206	-0.170***
	天然草地比例	-0.515***	-0.478***	-0.462***	-0.176
	有林地比例	0	-0.014	-0.770	-0.183*

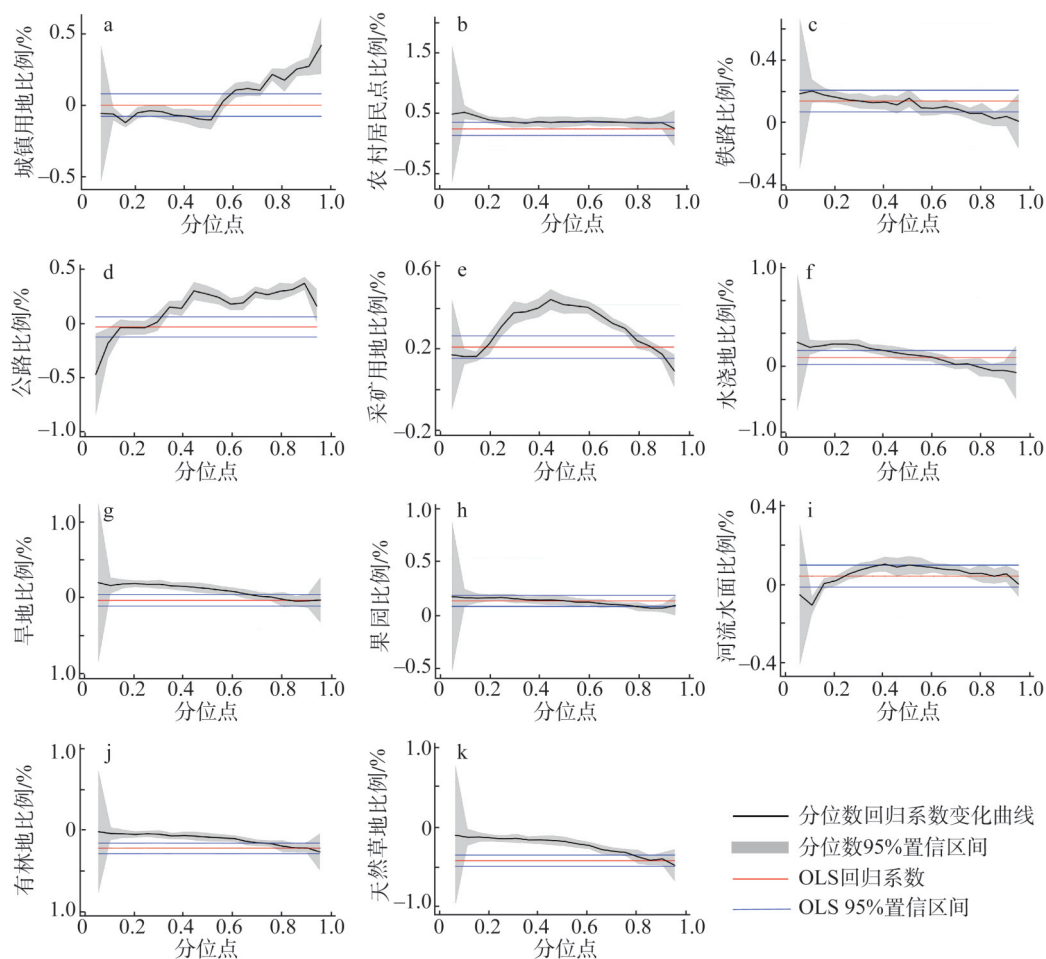


图6 分位数回归模型中各类用地比例在不同分位数下的参数变化

Fig. 6 Changing elasticity coefficients of the proportion of urban land, rural settlements, railways, highway, mining land, irrigated land, dry land, orchards, river, forests and natural grassland at different quantiles in quantile regression model

从不同区域来看,沿河县域对均衡度有显著贡献的用地主要是公路、采矿用地和河流水面比例,城镇用地、铁路、旱地和天然草地比例表现为负面影响(表4),说明对内交通建设对协调其供需关系有一定作用,同时,城镇化过程要十分注重土地节约集约利用和作为其优势资源的河流水面的保护,在需求提高的同时不造成供给的降低;自然保护区所在县域和存在自然保护区的沿河县域的生活用地比例与均衡度为正相关,而各类生产用地对这两个区域的影响不显著或为负面,主要是由于政策制度和环境条件的限制使得这些区域不适宜大规模建设和农业开垦,同时,有林地和天然草地对于保护区域自然系统和生态状况质量具有重要意义,应当从全局考虑进行长远安排,但其生态系统服务供需的协调和人居环境的优化要在生态保护优先的基础上对其他国土空间作出合理安排;其他县域对均衡度有显著贡献的用地比例包括农村居民点、水浇地和果园,铁路比例对均衡度的影响不显著,公路比例为负面影响,这些县域可以通过实施乡村振兴以及保护耕地和发展果业来提高均衡度,同时,退耕还林并不适宜所有区域^[37],尤其是水资源限制较大的黄土高原地区,应当遵循科学规律合理安排生态退耕。

3 结论

本文在核算黄河流域生态系统服务供给和需求的基础上,分析了2000—2015年黄河流域国土空间演变特征和生态系统服务供需均衡度时空变化及二者的共变趋势,进一步采用相关分析和分位数回归分析方法描述了黄河流域国土空间格局与生态系统服务供需均衡度之间的关系,探讨了黄河流域各类国土空间对供需均衡度的影响及其区域差异,可为黄河流域生态系统管理和人居环境优化提供借鉴。

(1) 黄河流域国土空间格局与生态系统服务供给和需求因自然地理条件差异呈现明显的区域分异,黄河及其主要支流沿线生产和生活用地密集分布,是流域发展的轴线;2000—2015年黄河流域生态系统服务的供给指数整体较高且小幅增加,需求指数整体较低且大幅增加,供需均衡度整体水平不高;生态系统服务供给增加与耕地和林地的分布一致,需求增加与人口密度和建设用地分布一致;生态系统服务供需均衡度变化与需求指数变化呈现一致性,需求指数较高的沿河县域供需均衡度显著高于其他区域,黄河流域生态系统服务供需均衡度的提高与需求增加密切相关。

(2) 黄河流域各类国土空间对生态系统服务供需均衡度的影响随均衡度水平变化而改变。在中低均衡度区间(分位点 ≤ 0.5),生活用地中的农村居民点和生产用地中的铁路、采矿用地、水浇地、旱地和果园比例对人类系统和自然系统的协调贡献显著,对外交通建设和工农业发展有助于平衡供需、协调人类系统与自然系统;在高均衡度区间(分位点 > 0.5),城镇用地和公路比例的作用显现,城镇化发展和对内交通基础设施建设等提高需求的措施可以更好地协调生态系统服务供需,天然草地和有林地等生态用地布局要从全局和长期进行考虑。

(3) 不同区域国土空间对生态系统服务供需均衡度的影响程度存在差异。沿河县域的对外交通已经较为完善,公路等对内交通建设对协调生态系统服务供需的作用开始凸显,其城镇化过程要十分注重土地节约集约利用和保护河流水面;自然保护区所在县域和存在自然保护区的沿河县域处在需要通过增加生活用地来平衡供需的状态,由于政策和环境等的限制这两个区域不适宜大规模发展工业和开垦农业;其他县域可以通过实施乡村振兴以及保护耕地和发展果业来协调生态系统服务供需。

限于数据可获得性,本文仅选取了2000年和2015年的截面数据来进行分析,后续研究中充实更多年份的数据或者采用高精度的卫星影像数据有助于提高研究结果的准确性和时空变异分析的全面性。此外,不同区域对生态系统服务供需均衡关系产生影响的国土空间类型可能不同,影响的大小也会存在差异,下一步研究中可以考虑从更大或更小尺度选择不同的研究区进行更为全面的分析,以丰富生态系统服务的供需研究,为协调供需和优化人居环境提供更为客观的借鉴。

参考文献(References):

- [1] COSTANZA R, ARGE A D, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] 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.]
- [3] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. *自然资源学报*, 2009, 24(1): 1-10. [LI W H, ZHANG B, XIE G D. Research on ecosystem services in China: Progress and perspectives. *Journal of Natural Resources*, 2009,

- 24(1): 1-10.]
- [4] 欧维新, 王宏宁, 陶宇. 基于土地利用与土地覆被的长三角生态系统服务供需空间格局及热点区变化. 生态学报, 2018, 38(17): 359-369. [OU W X, WANG H N, TAO Y. A land cover-base assessment of ecosystem services supply and demand dynamics in the Yangtze River Delta Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 359-369.]
- [5] 张宇硕, 吴殿廷, 吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1172-1189. [ZHANG Y S, WU D T, LYU X. A review on the impact of land use/land cover change on ecosystem services from a spatial scale perspective. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(5): 1172-1189.]
- [6] 翟天林, 王静, 金志丰, 等. 长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析. 生态学报, 2019, 39(15): 5414-5424. [ZHAI T L, WANG J, JIN Z F, et al. Change and correlation analysis of the supply-demand pattern of ecosystem services in the Yangtze River Economic Belt. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5414-5424.]
- [7] 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.]
- [8] DAILY G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington DC: Island Press, 1997.
- [9] 赵文武, 刘月, 冯强, 等. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. 地理科学进展, 2018, 37(1): 139-151. [ZHAO W W, LIU Y, FENG Q, et al. Ecosystem services for coupled human and environment systems. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 139-151.]
- [10] 杨莉, 甄霖, 潘影, 等. 生态系统服务供给—消费研究: 黄河流域案例. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 131-138. [YANG L, ZHEN L, PAN Y, et al. Ecosystem services supply and consumption: A case in Yellow River watershed, China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(3): 131-138.]
- [11] SCHIRPKE U, SCOLOZZI R, MARCO C D, et al. Mapping beneficiaries of ecosystem services flows from natural 2000 sites. *Ecosystem Services*, 2014, 9: 170-179.
- [12] AYANU Y Z, CONRAD C, NAUSS T, et al. Quantifying and mapping ecosystem services supplies and demands: A review of remote sensing applications. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(16): 8529-8541.
- [13] SERNA-CHAVEZ M, SCHULP C J E, VAN BODEGOM P M, et al. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24-33.
- [14] WANG J, ZHAI T L, LIN Y F, et al. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 781-791.
- [15] 彭建, 杨旻, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. 生态学报, 2017, 37(13): 4562-4572. [PENG J, YANG Y, XIE P, et al. Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong province based on the supply and demand of ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4562-4572.]
- [16] DOXIADIS C A. *Action for Human Settlements*. Athens: Athens Publishing Center, 1975.
- [17] 李雪铭, 夏春光, 张英佳. 近 10 年来我国地理学视角的人居环境研究. 城市发展研究, 2014, 21(2): 6-13. [LI X M, XIA C G, ZHANG Y J. Chinese human settlement research with geography perspective in recent 10 years. *Urban Development Studies*, 2014, 21(2): 6-13.]
- [18] 吴良镛. 人居环境导论. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. [WU L Y. *Introduction to Sciences of Human Settlements*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.]
- [19] PEÑA L, CASADO-ARZUAGA I, ONAINDIA M. Mapping recreation supply and demand using an ecological and a social evaluation approach. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 108-118.
- [20] BURKHARD B, KROLL F, NEDKOV S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [21] VILLA F, BAGSTAD K J, VOIGT B, et al. A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment. *PLoS ONE*, 2014, 9(3): e91001, Doi: 10.1371/journal.pone.0091001.
- [22] BOITHIAS L, ACUÑA V, VERGOÑÓS L, et al. Assessment of the water supply: Demand ratios in a Mediterranean Basin under different global change scenarios and mitigation alternatives. *Science of the Total Environment*, 2014, 470: 567-577.

- [23] KROLL F, MÜLLER F, HAASE D, et al. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. *Land Use Policy*, 2012, 29(3): 521-535.
- [24] 管青春, 郝晋珉, 许月卿, 等. 基于生态系统服务供需关系的农业生态管理分区. *资源科学*, 2019, 41(7): 1359-1373. [GUAN Q C, HAO J M, XU Y Q, et al. Zoning of agroecological management based on the relationship between supply and demand of ecosystem services. *Resources Science*, 2019, 41(7): 1359-1373.]
- [25] 罗辉. 自然保护区周边社区经济可持续发展路径研究: 以云南省为例. 昆明: 云南大学, 2015. [LUO H. Research on the path of sustainable development of economy in the nature reserves surrounding communities: A case of Yunnan. Kunming: Yunnan University, 2015.]
- [26] TWILLEY R R, BENTLEY S J, CHEN Q, et al. Co-evolution of wetland landscapes, flooding, and human settlement in the Mississippi River Delta Plain. *Sustainability Science*, 2016, 11(4): 711-731.
- [27] TRITSCH I, LE TOURNEAU F. Population densities and deforestation in the Brazilian Amazon: New insights on the current human settlement patterns. *Applied Geography*, 2016, 76: 163-172.
- [28] 鲁含情, 朱丽霞, 王宏志, 等. 仙桃市农村居民点分布与人居环境研究. *湖北大学学报: 自然科学版*, 2014, 36(5): 406-413. [LU H Q, ZHU L X, WANG H Z, et al. Spatial distribution and human settlement environment of rural residential areas in Xiantao city. *Journal of Hubei University: Natural Science*, 2014, 36(5): 406-413.]
- [29] 王深法, 沈兵明. 从德清县易地建城得失谈人居环境与土地资源配置优化. *经济地理*, 2002, 22(2): 204-207. [WANG S F, SHEN B M. The primary exploration human settlement environment and optimization of land resource about the evaluation of town construction at new place in Deqing county. *Economic Geography*, 2002, 22(2): 204-207.]
- [30] 王勇. 土地利用结构变化及其对人居环境的影响研究: 以大连市为例. 大连: 辽宁师范大学, 2015. [WANG Y. Land use structure change and its effects on human settlement: A case study of Dalian. Dalian: Liaoning Normal University, 2015.]
- [31] MOUTINHO V, MADALENO M, ROBAINA M. The economic and environmental efficiency assessment in EU cross-country: Evidence from DEA and quantile regression approach. *Ecological Indicators*, 2017, 78: 85-97.
- [32] 张鹏岩, 李颜颜, 康国华, 等. 黄河流域县域经济密度测算及空间分异研究. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(8): 128-135. [ZHANG P Y, LI Y Y, KANG G H, et al. A study on estimates and spatial differentiation of economic density at county level in Yellow River Basin. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(8): 128-135.]
- [33] WANG J, LIN Y F, ZHAI T L, et al. The role of human activity in decreasing ecologically sound land use in China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(3): 446-460.
- [34] 王静. 土地生态管护研究范式及其应用. 北京: 地质出版社, 2015. [WANG J. Research Paradigm and Application of Land Ecological Management and Protection. Beijing: Geological Publishing House, 2015.]
- [35] 覃成林, 周二黑. 黄河流域经济空间分异格局研究. *河南大学学报: 自然科学版*, 2010, 40(1): 40-44. [QIN C L, ZHOU E H. The patterns of spatial differentiation of economies in Yellow River Basin. *Journal of Henan University: Natural Science*, 2010, 40(1): 40-44.]
- [36] 李征. 黄河流域主体功能区划研究. 开封: 河南大学, 2009. [LI Z. The study on the regionalization of development priority zones of the Yellow River Basin. Kaifeng: Henan University, 2009.]
- [37] 黄麟, 翟俊, 宁佳. 不同气候带退耕还林对区域气温的影响差异分析. *自然资源学报*, 2017, 32(11): 1832-1843. [HUANG L, ZHAI J, NING J. Impacts of returning farmland to forest on regional air temperature in different climatic zones. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(11): 1832-1843.]

The relationship between supply and demand of ecosystem services and its spatio-temporal variation in the Yellow River Basin

LIU Jing-jing¹, WANG Jing², DAI Jian-wang³, ZHAI Tian-lin⁴, LI Ze-hui¹

(1. Wuhan University, School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan 430079, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. China Land Surveying and Planning Institute, Beijing 100035, China; 4. Henan Agricultural University, College of Resources and Environmental Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on the calculation of the ecosystem service supply, demand and coordination degree in the Yellow River Basin, we comprehensively analyzed the co-variation trend of land spatial pattern and coordination degree of supply-demand in this basin. Then, correlation analysis and quantile regression were used to analyze the influence of various land spaces on the coordination degree of supply-demand, and its regional heterogeneity. The results showed that: (1) Land spatial pattern, and supply and demand of ecosystem services showed significant spatio-temporal differentiation. The upper and middle reaches of the river and the lower reach are areas with densely distributed and significantly increased productive land and living land from 2000 to 2015. The increase in supply of ecosystem service was consistent with the distribution of cultivated land and forest land, and that in demand of ecosystem service was consistent with the distribution of population density and construction land. (2) The spatio-temporal change of the coordination degree was affected by the evolution of land spatial pattern. The influence of the land spaces on the coordination degree of supply and demand was different under different coordination levels, and there was significant regional heterogeneity in different regions. (3) According to different land spaces that had an impact on the coordination degree, different areas should rationally lay out land space and formulate development policies to promote effective ecosystem management.

Keywords: land spatial pattern; ecosystem services of supply and demand; coordination degree; spatio-temporal variation; Yellow River Basin