

DOI: 10.5846/stxb201707061225

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): - .  
Ou W X, Wang H N, Tao Y. A land cover-based assessment of ecosystem services supply and demand dynamics in the Yangtze River Delta region. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): - .

## 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

欧维新<sup>1,2</sup>, 王宏宁<sup>1</sup>, 陶宇<sup>1,2,\*</sup>

1 南京农业大学 土地管理学院, 南京 210095

2 农村土地资源利用与整治国家地方联合工程研究中心, 南京 210095

**摘要:**快速城市化与土地利用变化导致区域生态系统服务供需失衡,进而使得生态环境恶化已成为共识。开展生态系统服务供需关系及其空间量化研究,有助于识别出区域中存在的主要生态环境问题及其关键驱动。以长江三角洲为研究区,基于土地利用与土地覆被和生态系统服务供给和需求评价矩阵的方法对 1985—2015 年长三角生态系统服务供需盈亏格局及热点变化进行分析,结果表明:1) 长三角地区生态系统服务供给减少,需求增多,生态系统服务盈余区从 1985 年的 40.9% 下降至 2015 年的 38.5%,生态系统服务赤字区面积占比从 1985 年的 1.3% 增长到 2015 年的 10.6%,总体呈现供不应求的趋势;2) 沪宁杭城市发展梯度带上生态系统服务供需盈亏呈“V”型分布,且 30 年内城市中心及其附近的生态系统服务供需值下降更为明显;3) 30 年内长三角生态系统服务供需盈余热点区整体变化不大,30 年内面积减少了 0.1%;而赤字热点区则呈现出快速扩张趋势,面积占比 30 年内增加了 14.9%。说明随着城市化进程的加快,长三角生态系统服务供需亏损状况更严重;4) 生态系统服务供需评价矩阵可以比较简便、全面的反映出生态系统服务供需盈亏状况,研究结果可对快速城市化地区生态环境与土地利用规划与管理提供有益参考。

**关键词:**生态系统服务;供需关系;空间格局;长三角;土地利用与土地覆被

## A land cover-based assessment of ecosystem services supply and demand dynamics in the Yangtze River Delta region

OU Weixin<sup>1,2</sup>, WANG Hongning<sup>1</sup>, TAO Yu<sup>1,2,\*</sup>

1 College of Land Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing, 210095, China

2 National & Local Joint Engineering, Research Center for Rural Land Resources Use and Consolidation, Nanjing, 210095, China

**Abstract:** The rapid urbanization and changes in land use can result in imbalance between ecosystem services supply and demand at the regional scale, which is the major cause of regional ecosystem degradation. Therefore, it becomes essential to conduct quantitative analyses of ecosystem services supply and demand to identify key environmental issues and their driving forces in a region. In this paper, we present a comprehensive analysis of ecosystem services supply and demand dynamics during 1985—2015 for the Yangtze River Delta region, by employing the ecosystem services supply-demand assessment matrix approach based on land use and land cover types in the region. Our results showed 1) decreasing ecosystem services supply, but increasing ecosystem services demand for the Yangtze River Delta region over the past three decades. The area of the ecosystem service oversupply region decreased from 40.9% in 1985 to 38.5% in 2015, while the area of the ecosystem service undersupply region increased from 1.3% to 10.6% during the same period. 2) The ecosystem services supply-

**基金项目:**中央高校基本科研业务费青年基金项目(KJQN201847);江苏省博士后科研资助计划(1701112C);教育部高等学校学科创新 111 引智计划(B17024)

收稿日期:2017-07-06; 网络出版日期:2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: taoyu@njau.edu.cn

demand index value showed a “V” distribution pattern along the urban-rural gradient transects across Shanghai-Nanjing-Hangzhou. Peri-urban areas experienced dramatic decreases in ecosystem services supply-demand index value during the past three decades. 3) The area of the ecosystem services supply-demand surplus hotspot regions remained stable (only decreased by 0.1% over the past three decades), while the area of the ecosystem services supply-demand deficit hotspot regions increased dramatically by 14.9% during the same period. This indicates that the imbalance between ecosystem services supply and demand has become a critical issue for the rapidly urbanizing Yangtze River Delta region. 4) The ecosystem services supply-demand assessment matrix approach provides a simple and comprehensive way to quantify ecosystem services supply-demand dynamics of a region. The findings presented in this paper also provide new insights into regulating land use distributions and ecosystem conservation for rapidly urbanizing regions.

**Key Words:** ecosystem services; supply and demand; spatial pattern; Yangtze River Delta; land use and land cover

生态系统服务是人类从自然中所获得的惠益,强调了生态系统服务与人类福祉之间的关系<sup>[1]</sup>,主要由生态系统服务的供给和人类对于生态系统服务的需求来反映。区域生态环境问题主要源自城市化和土地利用变化对区域生态系统结构和格局改变,其实质是区域生态系统服务供需关系的空间差异或失衡所导致的。因此,生态系统服务供需关系及其空间测度是识别区域主要生态环境问题并揭示其内在驱动的关键所在<sup>[2-3]</sup>。目前生态系统服务供给研究已有大量有益探索,其量化方法较为成熟<sup>[4-6]</sup>。近年来学者们开始关注生态系统服务供给与需求的综合研究,尤其是生态系统服务供给与需求的空间量化已成为生态系统服务研究的关注重点<sup>[7-9]</sup>。但目前的研究重点主要集中于生态系统服务供给服务的供需量化,对于生态系统调节服务、文化服务及其在区域内的供需关系的研究还尚缺乏,其主要原因是由于目前没有较好的方法对其进行量化。基于此 Burkhard 等提出了基于专家知识的生态系统服务供需量化矩阵方法,即针对生态完整性、供给服务、调节服务以及文化服务 4 个大项 29 个小项,其中每项的分值按照不同土地利用类型对生态系统服务供给或需求的贡献进行 0—5 之间的赋值,并以此来量化生态系统服务供需及其空间格局<sup>[10-11]</sup>。尽管这种方法在反映区域和各土地类型生态系统服务供需差别上还存在一些不确定性以及专家本身知识的有限性<sup>[12-15]</sup>,但其可以较为简便地量化区域生态系统服务供需格局的空间变化趋势,因而被越来越多的学者关注<sup>[16-19]</sup>。

长江三角洲地区包含上海市、江苏省和浙江省 3 省 16 个城市,是我国当前经济和城市化发展速度最快的地区之一,其土地利用变化显著改变了区域生态系统的结构和格局,水调节、气候调节等相关的诸多生态环境风险日趋严重,经济社会的发展与城市的扩张引致的区域生态系统服务需求增加与服务供给能力下降并存的趋势还将继续存在。因此,量化测度长三角生态系统服务供需格局变化及其在不同城市带上的分布规律、识别长三角生态系统服务的供需盈亏的热点区域等相关研究工作的开展,不仅可以丰富生态系统服务相关研究,还可为优化区域生态系统服务供需格局、区域生态环境和土地利用等规划管理提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 长三角土地利用类型划分

本研究选择 1985 年、2000 年和 2015 年 3 期土地利用现状数据,均来源于地理国情监测云平台基于 Landsat TM 30 m 遥感影像生产的全国土地利用数据产品,整体精度在 75% 以上。结合刘纪远等<sup>[20]</sup>在建设“中国 20 世纪 LUC 时空平台”建立的 LUC 分类系统,将其土地利用类型归结为包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地在内的 6 个一级类和包括有林地、灌木林、疏林地、其他林地和高、中、低覆盖度草地等 25 个二级类型,在与 Burkhard 等研究中采用的欧盟环境协调(Co-Ordinated Information on the Environment, CORINE)土地分类法比对后进行了相应地类的调整与归并,确定了本研究的土地分类体系(表 1)。

表 1 土地利用分类整合表

Table 1 Classification of land use and land cover in the Yangtze River Delta region and the corresponding CORINE land cover types

整合地类 Land Cover	参考 CORINE 分类 CORINE land Cover	整合地类 Land Cover	参考 CORINE 分类 CORINE land Cover
旱地 DL	非灌溉耕地	沿海滩涂 B	海滩、沙丘和沙平原、潮滩
水田 PF	永久灌溉耕地, 稻田	内陆滩地 BL	海滩、沙丘和沙平原
有林地 W	农林区、阔叶林、针叶林、混交林	城镇用地 UL	连续城市结构、工业或商业单元等
灌木林 SH	过渡性森林灌丛	农村居民点 RL	不连续城市结构
疏林地 SW		其他建设用地 OCS	机场、采矿区、垃圾场、建筑地等
其他林地 OW	果园、葡萄园、橄榄园	盐碱地 SS	盐土地等
高覆盖度草地 HCG		沼泽地 ML	内陆沼泽、泥潭沼泽、沼泽和石楠
中覆盖度草地 MCG	天然草地、牧场	裸土地 BL	稀疏植被
低覆盖度草地 LCG		裸岩地 BRL	裸岩
水体 WB	水道、水体	其他 OL	其他

注:DL:旱地,Dry land;PF:水田,Paddy filed;W:有林地,Woodland;SH:灌木林,Shrubbery;SW:疏林地,Sparse woodland;OW:其他林地,Other woodland;HCG高覆盖度草地,High coverage grassland;MCG:中覆盖度草地,Medium coverage grassland;LCG:低覆盖度草地,Low coverage grassland;WB:水体,Water body;B:沿海滩涂,Beach;BL:内陆滩地,Bottomland;UL:城镇用地,Urban land;RL:农村居民点 Rural land;OCS:其他建设用地,Other construction sites;SS:盐碱地,Saline-alkali soil;ML:沼泽地,Marshland;BL:裸土地,Bare land;BRL:裸岩地,Bare rock land;OL:其他,Other land

### 1.1.2 区域重要生态系统服务类型选择

生态系统服务主要分为供给服务、调节服务、文化服务以及支持服务,由于支持服务是前三类服务的基础和前提且其与人类福祉没有直接的关联,本研究仅考虑生态系统供给服务、调节服务及文化服务类型,包括农作物供给、局地气候调节、全球气候调节、洪水防护、水净化等 23 项生态系统服务。

### 1.1.3 基于土地利用/覆被类型的生态系统服务供需评价矩阵

参考 Burkhard 的研究成果,结合地类调整情况与长三角地区各土地利用类型的生态系统服务供给与需求特点,构建形成了长三角地区生态系统服务供需评价矩阵(表 2)。其中不同土地利用类型各项生态系统服务的供需水平打分为:0 = 对应土地利用类型无相关生态系统服务供给/需求,1 = 对应土地利用类型有较低水平的生态系统服务供给/需求,2 = 对应土地利用类型有一般水平的生态系统服务供给/需求,3 = 对应土地利用类型有中等水平的生态系统服务供给/需求,4 = 对应土地利用类型有较高水平的生态系统服务供给/需求,5 = 对应土地利用类型有极高水平的生态系统服务供给/需求。本研究在基于 Burkhard 团队研究成果的基础之上,结合表 1 中的土地利用对应类型,将 3 大类 23 小项生态系统服务的供给/需求值分别在表 2 中列出,并以供给服务、调节服务和文化服务分别进行汇总。

### 1.1.4 区域生态系统服务供需综合指数

本研究以格网为评价单元来测度长三角地区的生态系统服务供需关系。在查阅了有关于土地利用的格网研究当中,同时考虑到最小可塑性单元(MAUP)对研究结果的影响<sup>[21]</sup>,参考关于土地利用研究中格网构建文献(表 3)<sup>[22-29]</sup>,并结合研究区大小,发现常用的格网分析单元主要有 500 m×500 m、1 km×1 km、3 km×3 km、5 km×5 km、10 km×10 km 等,为了比较不同格网单元大小对揭示土地利用变化时空格局特征的可能影响,研究针对长三角土地利用/覆被数据,比较了不同格网尺度下土地利用变化时空格局特征及其差异,发现不同格网尺度下各类型生态系统服务供需情况的分析结果总体上较为一致,考虑到 5 km×5 km 的格网尺度相对更接近于长三角地区典型村镇单元的平均大小(25 km<sup>2</sup>),其评价结果对决策管理也更有参考价值,在多次调整网格大小后拟定 5 km×5 km 的网格为评价单元。

表 2 基于土地利用类型的生态系统服务供给/需求评价矩阵  
Table 2 Assessment matrix illustrating the supply of /demand for ecosystem services of different land cover classes

土地类型 Type of land cover	供给 服务 PS	农作物 C	牲畜 L	饲料 F	水产 捕捞 CF	野生 食物 WF	木材 T	薪柴 WF	能量 E	生物 医疗 BM	淡水 FW	调节 服务 RS	局地气 候调节 LCR	全球气 候调节 GCR	洪水 防护 FP	地下水 供给 GR	空气质 量调节 AQR	侵蚀 调节 ER	营养 调节 NR	水净化 WP	传粉 P	文化 服务 CS	娱乐美 学价值 RAC	多样性 内在 价值 IVB	知识 体系 KS
旱地 DL	21/4	5/1	5/0	5/0	0/0	0/0	0/0	3/0	2/1	1/1	0/1	6/15	2/2	1/2	1/2	1/0	0/1	0/2	1/3	0/0	0/3	3/0	1/0	0/0	2/0
水田 PF	16/7	5/1	5/0	2/0	0/0	0/0	0/0	3/0	1/2	0/1	0/3	6/25	3/2	1/2	1/2	0/5	0/1	0/2	1/3	0/5	0/3	3/0	1/0	0/0	2/0
有林地 W	26/3	0/0	0/0	1/0	0/0	5/1	5/1	5/1	3/0	5/0	2/0	40/0	5/0	4/0	4/0	2/0	5/0	5/0	5/0	5/0	5/0	15/0	5/0	5/0	5/0
灌木林 SH	24/3	0/0	0/0	1/0	0/0	5/1	4/1	5/1	3/0	5/0	1/0	39/0	5/0	4/0	3/0	2/0	5/0	5/0	5/0	5/0	5/0	14/0	5/0	5/0	4/0
疏林地 SW	22/3	1/0	0/0	1/0	0/0	3/1	5/1	5/1	3/0	3/0	1/0	38/0	5/0	3/0	3/0	2/0	5/0	5/0	5/0	5/0	5/0	13/0	5/0	4/0	4/0
其他林地 OW	18/7	5/1	0/0	1/0	0/0	2/1	2/1	4/1	3/2	1/0	0/1	23/8	2/0	3/0	2/1	2/0	3/0	2/0	3/1	2/0	4/0	12/0	5/0	3/0	4/0
高覆盖度草地 HCG	14/1	0/0	4/0	3/1	0/0	4/0	0/0	2/0	0/0	1/0	0/0	25/0	2/0	3/0	1/0	1/0	1/0	5/0	5/0	5/0	2/0	12/0	3/0	4/0	5/0
中覆盖度草地 MCG	11/1	1/0	3/0	2/1	0/0	3/0	0/0	1/0	0/0	1/0	0/0	23/0	2/0	2/0	1/0	1/0	1/0	5/0	4/0	5/0	2/0	10/0	3/0	3/0	4/0
低覆盖度草地 LCG	10/2	1/0	3/0	1/1	0/0	3/0	0/0	1/0	0/0	1/0	0/1	19/0	2/0	1/0	1/0	1/0	1/0	4/0	4/0	4/0	1/0	10/0	3/0	3/0	4/0
水体 WB	18/3	0/0	0/0	1/0	3/2	4/0	0/0	0/0	2/0	3/0	5/1	8/8	2/2	1/1	1/1	2/2	0/0	0/0	1/1	1/1	0/0	15/0	5/0	5/0	5/0
沿海滩涂 B	4/4	0/0	0/0	0/0	2/2	2/2	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	7/7	1/1	0/0	5/5	0/0	0/0	0/0	1/1	0/0	0/0	7/1	5/1	1/0	1/0
内陆滩涂 BL	7/5	2/2	0/0	1/1	1/0	1/0	0/0	1/1	0/0	0/0	1/1	8/8	1/1	0/0	5/5	0/0	0/0	1/1	1/1	0/0	0/0	7/1	5/1	1/0	1/0
城镇用地 UL	0/41	0/5	0/5	0/1	0/5	0/5	0/3	0/2	0/5	0/5	0/5	0/28	0/5	0/3	0/4	0/5	0/5	0/2	0/1	0/0	0/0	5/11	3/5	0/1	2/5
农村居民点 RL	0/40	0/5	0/4	0/3	0/4	0/4	0/3	0/3	0/4	0/5	0/5	0/27	0/5	0/3	0/4	0/5	0/5	0/2	0/1	0/0	0/0	4/11	2/5	0/1	2/5
其他建设用地 OCS	0/19	0/2	0/0	0/1	0/1	0/1	0/1	0/2	0/4	0/3	0/3	3/22	0/4	0/3	2/4	0/3	0/3	1/2	0/1	0/1	0/1	2/4	1/2	0/0	1/2
盐碱地 SS	3/0	1/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/0	1/0	0/0	0/0	0/0	2/0	0/0	0/0	0/0	1/0	0/0	0/0	1/0	0/0	0/0	7/0	3/0	1/0	3/0
沼泽地 ML	13/0	0/0	2/0	4/0	1/0	2/0	0/0	0/0	2/0	0/0	2/0	21/0	4/0	3/0	2/0	2/0	1/0	0/0	3/0	4/0	2/0	10/0	3/0	4/0	3/0
裸土地 BL	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	3/0	0/0	0/0	1/0	1/0	0/0	0/0	0/0	1/0	0/0	3/0	1/0	1/0	1/0
裸岩地 BR	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	3/0	0/0	0/0	1/0	1/0	0/0	0/0	0/0	1/0	0/0	4/0	2/0	1/0	1/0
其他 OL	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	3/0	0/0	0/0	1/0	1/0	0/0	0/0	0/0	1/0	0/0	3/0	1/0	1/0	1/0

PS: 供给服务, Provisioning service; C: 农作物, Crops; L: 牲畜, Livestock; F: 饲料, Fodder; CF: 水产捕捞, Capture fisheries; WF: 野生食物, Wild food; T: 木材, Timber; WF: 薪柴, Wood fuel; E: 能量, Energy; BM: 生物医疗, Biochemical and medicine; F: 淡水, freshwater; RS: 调节服务, Regulating services; GCR: 全球气候调节, Global climate regulation; LCR: 局地气候调节, Local climate regulation; FP: 洪水防护, Flood protection; GR: 地下水供给, Groundwater recharge; AQR: 空气质量调节, Air quality regulation; ER: 侵蚀调节, Erosion regulation; NR: 营养调节, Nutrient regulation; WP: 水净化, Water purification; P: 传粉, Pollination; CS: 文化服务 Cultural services; RAV: 娱乐美学价值, Recreation and aesthetic values; IVB: 多样性内在价值, Intrinsic value of biodiversity; KS: 知识体系, Knowledge systems

表 3 土地利用变化时空格局研究空间评价单元设置

Table 3 Different grid cell sizes used in evaluating land cover change and ecosystem services dynamics

作者 Authors	研究区 Area	格网大小 Grid size	研究内容 Research content
唐秀美等 <sup>[22]</sup>	北京市海淀区	500 m×500 m	生态系统服务
马昕炜等 <sup>[23]</sup>	张家界永定区	1 km×1 km	土地利用总体规划生态环境影响
阳文锐等 <sup>[24]</sup>	常州市	1 km×1 km	生态服务功效评价
吴健生等 <sup>[25]</sup>	平朔矿区	1.5 km×1.5 km	矿区景观生态风险
郭椿阳等 <sup>[26]</sup>	河南省永城市	3 km×3 km	土地利用转型
王雅等 <sup>[27]</sup>	黑河中游	5 km×5 km	生态系统服务
高宾等 <sup>[28]</sup>	锦州湾	10 km×10 km	湾区景观生态风险
刘世梁等 <sup>[29]</sup>	云南省红河流域	20 km×20 km	流域景观生态风险

根据生态系统服务供需评价矩阵(表 2),构建基于格网的生态系统服务供给能力( $E_s$ )和需求强度( $E_d$ )模型(式 1),进而利用两者的差值(式 2)表征该格网的生态系统服务供需盈亏值( $E_{SD}$ )。

$$E_s(E_d) = \frac{\sum_{k=1}^l E_k M_k}{M_i} \quad (1)$$

$$E_{SD} = E_s - E_d \quad (2)$$

式中, $E_k$ 表示  $k$  地类的生态系统服务供给能力或需求强度值; $M_k$ 为网格中  $k$  地类的面积; $l$ 为网格中土地类型数量; $M_i$ 为网格面积; $E_s$ 、 $E_d$ 的取值范围均为-110—110。

对长三角生态系统服务供需盈亏值进行等距划分,将长三角生态系统服务供需盈亏划分为生态系统服务赤字严重区、赤字一般区、供需均衡区、盈余一般区和盈余充足区 5 个等级,分别用 1、2、3、4、5 表示。转移矩阵可以很好地刻画生态系统服务供需盈亏等级的转变强度以及演变规律,因此本研究在对长三角生态系统服务供需盈亏进行分等的基础上,利用转移矩阵分析各等级之间 30 年内的转移情况。

### 1.1.5 生态系统服务供需盈亏空间梯度分析

空间梯度是指沿某一方向景观特征有规律地逐渐变化的空间特征<sup>[30]</sup>。近些年,空间梯度分析在生态系统服务供给<sup>[31-32]</sup>以及供需<sup>[5-6]</sup>的空间化研究中也得到了一些应用。为了深入分析长三角各城市生态系统服务供需盈亏变化梯度分布规律及 30 年间的变化趋势,本研究在分析长三角生态系统服务供需盈亏空间格局的基础之上,以上海、杭州和南京 3 个城市为端点、以 5 km 格网为带宽所形成的 3 个城市间发展梯度带,即宁沪带、沪杭带和宁杭带(图 1),分析 3 个梯度带不同时期生态系统服务供需的分布规律。

### 1.1.6 长三角生态系统服务供需盈亏热点区识别方法

局部空间自相关指数可反映某一空间单元的属性值同其邻接空间单元上同一属性值的相关和空间聚集程度<sup>[33-35]</sup>。本研究拟采用空间统计分析,通过计算局部 Moran's I 指数识别长三角生态系统服务供需盈亏热点区,主要利用 ArcGIS 软件中的空间分析模块中的聚类和异常值分析,对长三角生态系统服务供需盈亏热点区域进行识别。将低低聚集区定义为生态系统服务供需赤字热点区,将剔除掉负值后的高高聚集区定义为生态系统服务供需盈余热点区。

## 2 结果与分析

### 2.1 长三角生态系统服务供需盈亏变化

汇总生态系统服务供需盈亏值发现长三角供需总盈余值由 1985 年的 29.12 减少至 2015 年的 22.32,整体上,长三角 30 年内生态系统服务呈现供不应求的趋势。

从图 2 和图 3 中可以看出,长三角生态系统服务供需均衡区面积仍占区域主导,其分布主要处于耕地及其周边,表明长三角地区 30 年内的生态系统服务供需盈亏还处于较好的状态。供需均衡区在 30 年内的变化

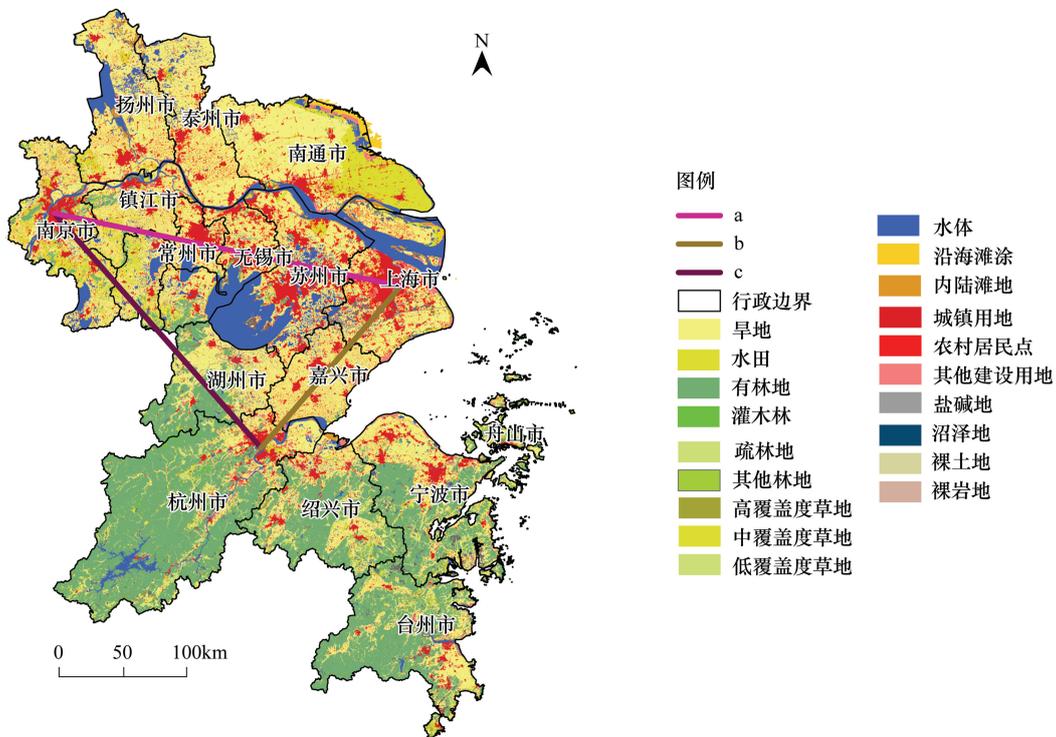


图 1 沪宁杭梯度样带示意图

Fig.1 Gradient transects across Shanghai-Nanjing-Hangzhou

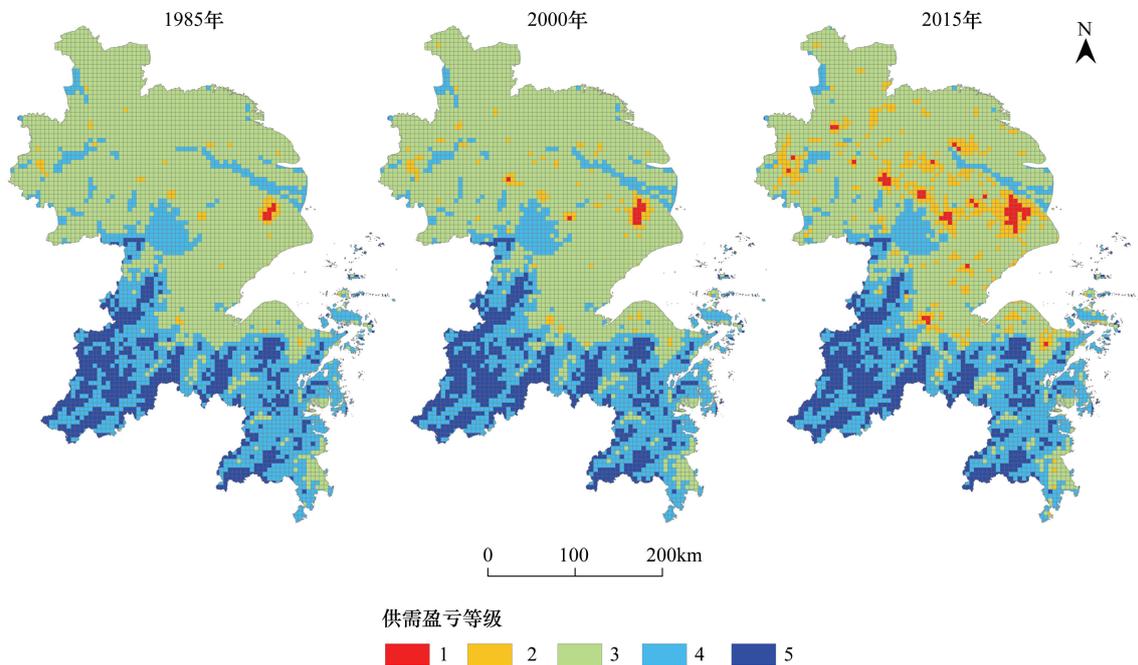


图 2 长三角生态系统服务供需盈亏等级图

Fig.2 Ecosystem services supply-demand levels in the Yangtze River Delta region

具有一定的波动性,1985年到2000年间面积增长了2.23%,但后15年内却降低了9.01%。这可能是前15年农业用地挤占生态用地导致生态系统供需平衡区的面积有所增加,对生态系统供需盈余一般区的侵占,而后15年建设用地占用耕地及其他用地导致平衡区面积减少。30年间生态系统服务供需赤字严重区和赤字一般

区均处增长状态,其中赤字一般区面积由 1.17% 增长到 9.33%,增幅近 7 倍;赤字严重区面积仅增长了 1.11%。从时空动态特征来看,赤字严重区主要分布在上海、南京、苏锡常以及杭州等大城市的城区,并随着城市扩张而扩大;赤字一般区分布在赤字严重区的外围或中小城市的城区周边。可见,城镇建设用地扩张在带动经济发展的同时,也加剧了长三角生态系统服务供需不平衡状态。生态系统服务供需盈余区面积总体上也是减少的,但幅度不大;一般盈余区 30 年间减少了 2.76%,而盈余充足区则几乎没有变化,空间上盈余一般区和盈余充足区主要分布于土地类型为林地、草地和水域等生态用地周边,这是长三角生态系统服务供给的核心区域,也是长三角地区生态保护重点区域。

为了进一步探讨 30 年间长三角生态系统服务供需盈亏的空间演变特征以及各个等级之间的转移规律,建立生态系统服务供需盈亏转移矩阵(表 4),结果显示:(1)在表 3 中,对角线的元素表示的是长三角生态系统服务供需盈亏等级稳定区域,可以看出两个时间段中的盈亏等级主要是以稳定为主,赤字一般区的稳定概率两个时间段都为最低,特别是后 15 年,赤字一般区的稳定概率只有 64.53%。结合图 2,空间上可以看出这个区域主要集中于一些中小城市以及大城市的周边,说明城市化对城市及其周边的生态系统服务供需平衡影响是最大的。

(2)对角线的右上方元素代表生态系统服务盈亏等级上升的概率,相对应的左下方的元素则代表长三角生态系统服务供需盈亏等级下降的概率,从两个时间段的总和上可以看出,盈亏等级下降的比例分别是上升比例的 10.29 倍和 91.87 倍,说明长三角 30 年内生态系统服务供不应求的趋势显著,且后 15 年内更加剧烈。

表 4 长三角生态系统服务供需盈亏等级转移概率矩阵

Table 4 Transfer matrix of different ecosystem services supply-demand levels in the Yangtze River Delta region

		2000					2015						
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
1985	1	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2000	1	100	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	13.26	86.74	0.00	0.00	0.00		2	35.33	64.53	0.14	0.00	0.00
	3	0.00	2.27	97.55	0.19	0.00		3	0.23	13.70	85.70	0.36	0.00
	4	0.09	0.19	7.68	89.93	2.11		4	0	0.08	8.05	91.69	0.18
	5	0.00	0.00	0.00	0.17	99.83		5	0.00	0.00	0.02	5.06	94.92

1:赤字严重区,demand exceeds supply greatly;2:赤字一般区,demand exceeds supply slightly;3:供需均衡区,supply-demand balance;4:盈余一般区,supply exceeds demand slightly;5:盈余充足区,supply exceeds demand greatly

## 2.2 生态系统服务梯度变化

将宁沪带、杭沪带以及宁杭带 3 条梯度带所经过的格网的生态系统服务供需盈亏值作为纵坐标,以由西向东距端点的距离作为横坐标得到 3 条梯度带上的生态系统服务供需盈亏状态分布图(图 4)。

结果表明:(1)从 3 条梯度带的生态系统服务供需状态的空间分布来看,长三角各城市之间的生态系统服务供需盈亏情况差别明显,各城市的城市中心区处于低值区,远离城市中心则为高值区,呈“V”或多“V”型分布。宁沪带(图 4a)主要经过南京、镇江、常州、无锡、苏州和上海,此梯度带上的生态系统服务供需盈亏状态呈现明显的“V”型分布;杭沪带(图 4b)经过了杭州、嘉兴和上海 3 个城市,杭州地区西部主要是以林地为主,生态系统服务供需值较高,往东城市主城区的生态系统服务逐步降低;嘉兴主要以耕地为主,生态系统服务供需状态处于均衡区,2015 年降低较为明显;上海西南部以耕地为主,生态系统服务供需值分布在 0 左右,市中心处于低值区;宁杭带(图 4c)穿过了南京、常州、湖州和杭州,除了南京和杭州以外,没有经过其他城市

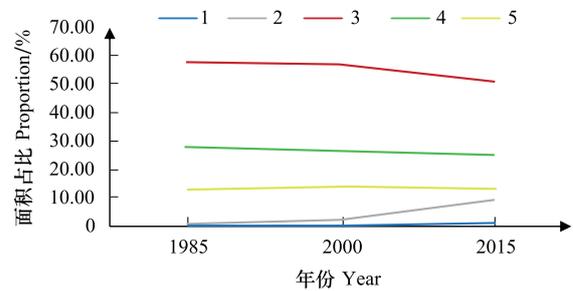


图 3 长三角生态系统服务供需盈亏各等级面积比例

Fig.3 Percentage of area of different ecosystem services supply-demand levels in the Yangtze River Delta region

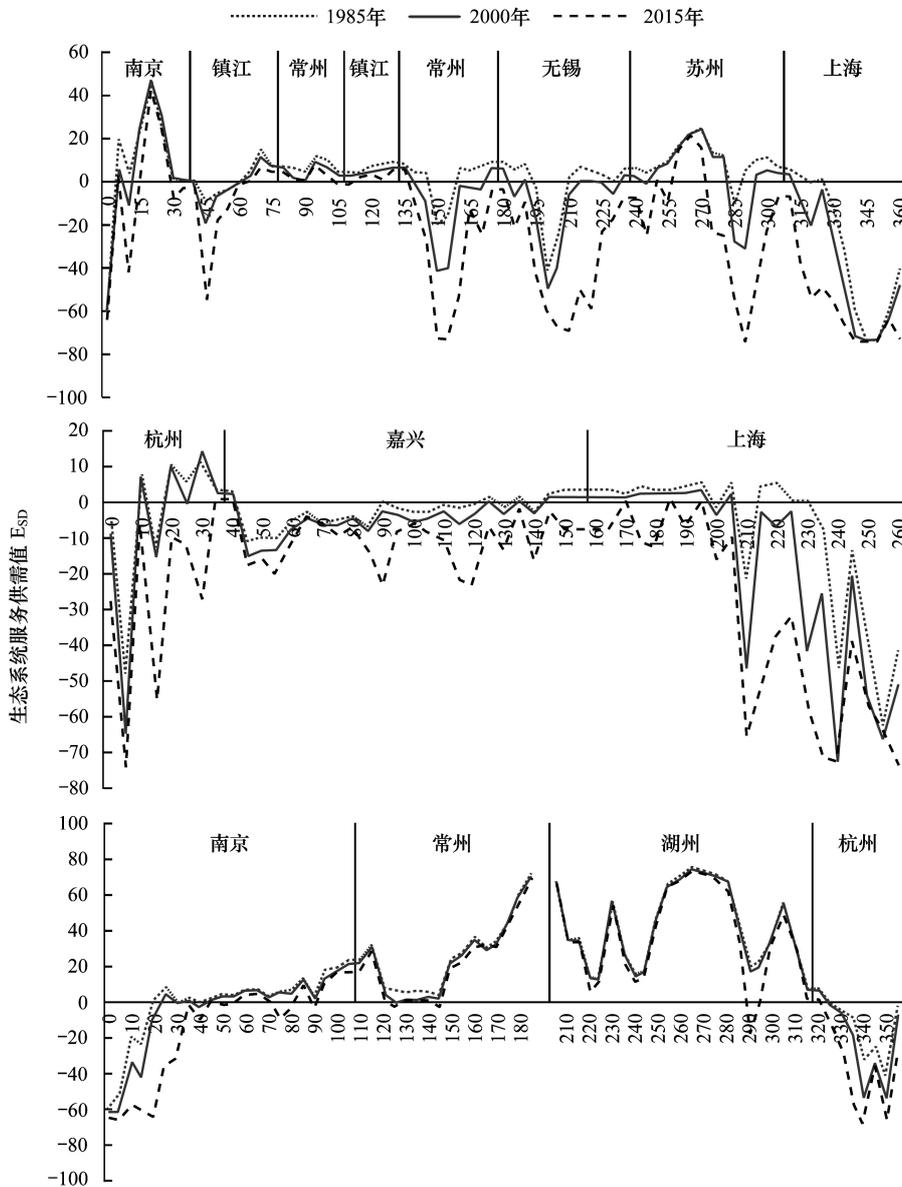


图4 长三角生态系统服务供需盈亏状况梯度分布图

Fig.4 Urban-rural gradient analysis of ecosystem services supply and demand in the Yangtze River Delta region

的主城区,因此“V”型分布不是很明显,生态系统服务供需盈亏状态也处于较高水平。(2)从生态系统服务供需值的时间变化上看,30年内生态系统服务供需状态在大部分区域都呈现出下降的趋势。1985—2015年这30年内3条梯度带上的生态系统服务供需盈亏状态分布情况可以看出,2015年的值在大部分区域都是处于最低的位置,且在城市中心区的降低幅度更明显,生态环境较好地区的变化幅度相对较小。

### 2.3 长三角生态系统服务供需盈亏热点区时空动态

通过对生态系统服务供需盈亏分布图进行局部自相关分析,识别出了长三角生态系统服务供需盈亏的热点区域(图5),包括供需“盈余”热点区(高值聚类区域)和供需“赤字”热点区(低值聚类区域)和不显著区,并统计出各类型区域面积占比(图6)。各年份的Moran's I指数全为正,表明长三角生态系统服务供需存在显著的空间自相关。

统计发现,长三角生态系统服务供需盈余热点区面积在3个年份占比分别为25.41%,25.87%和25.28%,变化幅度相对较小,整体上略有下降;赤字热点区3个时期的面积占比分别为3.01%,6.19%和17.87%,30年

内增长了近 5 倍。从长三角生态系统服务供需赤字和盈余热点区的空间分布来看,生态系统服务供需赤字区主要分布于长三角地区的中北部地区,且集中在城市的周边,整体上呈现一种向四周扩张的趋势。这主要是由于长三角城市化进程的加快,社会经济发展、人口增长对建设用地需求的加大导致了生态系统服务需求增多和供给能力的减弱,城市中心附近的集聚效应进一步加大;长三角生态系统服务供需盈余热点区整体的变化不大,主要集中于长三角南部的林地区,这个区域也是长三角地区所必须保证的生态稳定区,对长三角生态环境与可持续发展有着很重要的作用。

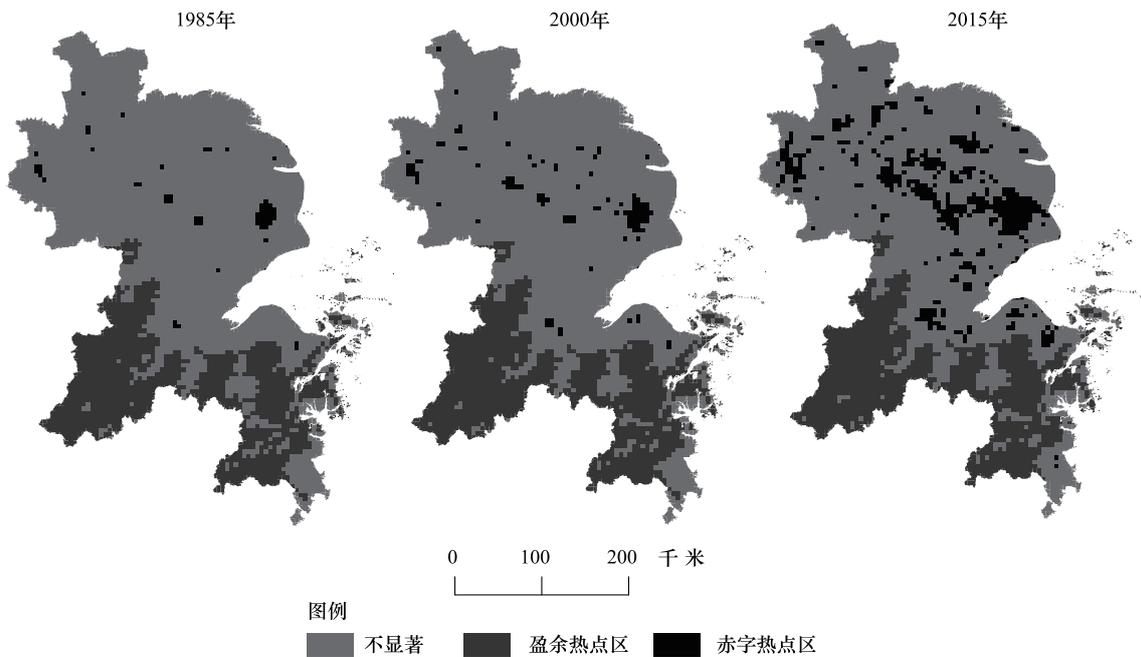


图 5 长三角生态系统服务供需盈亏热点分布

Fig.5 Hotspot regions of ecosystem services supply-demand surplus and deficit in the Yangtze River Delta region

### 3 结论与讨论

本研究参考 Burkhard 构建的生态系统服务供给需求评价矩阵的基础上,以 5 km×5 km 的网格为研究单元,建立生态系统服务供需盈亏综合指数,分析长三角地区生态系统服务供需盈亏关系及其热点区格局变化,结果表明:

(1)长三角地区生态系统服务供需关系逐步向供不应求方向发展。生态系统服务赤字区面积占比从 1985 年的 1.33% 增长到 2015 年的 10.60%,增长了将近 7 倍,而生态系统服务盈余区总体上呈现下降趋势,从 1985 年的 40.94% 下降至 2015 年的 38.46%;从各等级之间的转移来看,生态系统服务赤字区变化较为剧烈,整体向供需赤字区转变;

(2)通过空间梯度分析,各城市发展带上的生态系统服务供需状态都呈现较为明显的“V”型分布,由于各城市的城市发展模式不尽相同,生态系统服务供需盈亏值具体的分布特征也不一致,但从 30 年的生态系统服务供需值变化来看,城市中心及其附近值降低较大,而生态环境较好的区域变化相对较小;

(3)长三角生态系统服务供需盈亏单元之间存在着很强的局部空间自相关关系,30 年内生态系统服务供

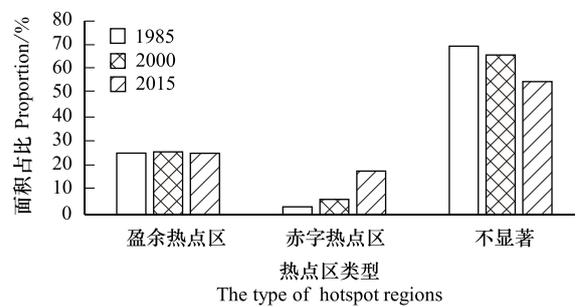


图 6 长三角生态系统服务供需盈亏热点区比例图

Fig.6 Percentage of area of the hotspot regions of ecosystem services supply-demand surplus and deficit in the Yangtze River Delta region

需盈余热点区主要集中在长三角西南部的林地区,且整体面积变化不大,这个区域是长三角生态环境保护的天然屏障,需要进行重点保护;而赤字热点区则呈现出快速扩张趋势,城市扩张速度在 2000—2015 年较快,对生态系统服务需求的增加十分迅速。

生态系统服务与人类福祉是息息相关的,生态系统服务的供给是与自然环境本身相关联的,其需求则与人口增长和社会经济的发展有关,单从生态系统服务的供给方面进行研究和分析,与人类福祉之间的关联也就被隔断。生态系统服务需求是人类生存与发展所最基本的要求,怎样去量化人类对生态系统服务的需求成为了难点,当前已有的研究也只是从生态系统供给服务角度进行分析,对于调节服务和文化服务的涉及相对较少。Burkhard 等基于欧盟环境协调土地分类法和专家咨询构建生态系统服务供需评价矩阵在一定程度上可以满足当前的研究需要, Li 和 Zhang 等分别利用生态系统服务供需评价矩阵尝试构建生态系统服务流和生态系统服务供给率等指标来反映区域生态系统服务的供需关系<sup>[16-17]</sup>,本研究则尝试利用矩阵对长三角生态系统服务供需关系、梯度分布规律以及盈余赤字热点区进行识别。评价矩阵法存在着一定的不确定性,这种半定量的方法不能将长三角地区的生态系统服务供需状况完全刻画,但可以将生态系统服务供需格局的变化趋势完整的表现出来,为缓解长三角以及其他快速城市化地区的生态系统服务供需矛盾提供一定的科学依据。

目前这种评价方法的不确定性较大,区域与专家的选择对矩阵的影响也不可忽略, Burkhard 基于国外当地情况的评分结果与我国长三角地区不同土地利用类型的供需得分虽然会有些许差别,但无论是欧洲地区还是在长三角,城镇建设用地、农业用地、生态用地三大地类之间生态系统服务供需得分的相对高低都是较一致的。考虑到直接将 Burkhard 的供需矩阵得分套用在其他地区(如长三角地区)可能存在的适用性问题,我们将在今后的研究中邀请长三角地区相关领域专家针对供需矩阵得分进行修正,使得这种方法具有更好的适用性。尺度问题也是生态系统服务供需关系的一个重要范式,格网的方法可以解决生态系统服务供需关系发生的区域性特征,但是格网的大小也会导致尺度效应的产生。未来研究需要将生态系统服务供需评价矩阵和供需综合指数的构建更加细致化,如尺度效应方面,以流域和行政区为评价单元对城市化地区的生态系统服务供需关系进行研究,并结合生态系统服务权衡和协同以及生态系统服务流理论来完善当前的研究体系。此外,全类型的生态系统服务供需综合研究,在识别区域主导的生态系统供需矛盾上存在困难,未来应针对区域的关键生态环境问题,遴选主导的生态系统服务供需类型进行有针对性的研究,以服务区域生态环境建设地方实践需要。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Biodiversity Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [ 2 ] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 赵志强. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. 地理学报, 2011, 66(12): 1618-1630.
- [ 3 ] 李双成, 王珏, 朱文博, 张津, 刘娅, 高阳, 王阳, 李琰. 基于空间与区域视角的生态系统服务地理学框架. 地理学报, 2014, 69(11): 1628-1639.
- [ 4 ] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [ 5 ] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展. 资源科学, 2001, 23(6): 5-9.
- [ 6 ] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 曹淑艳, 肖玉. 生态系统服务的供给、消费和价值化. 资源科学, 2008, 30(1): 93-99.
- [ 7 ] Kroll F, Müller F, Haase D, Fohrer N. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. Land Use Policy, 2012, 29(3): 521-535.
- [ 8 ] Hou Y, Müller F, Li B, Kroll F. Urban-rural gradients of ecosystem services and the linkages with socioeconomics. Landscape Online, 2015, 39: 1-31.
- [ 9 ] 杨莉, 甄霖, 潘影, 曹晓昌, 龙鑫. 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.
- [ 10 ] Burkhard B, Kroll F, Müller F, Windhorst W. Landscapes' capacities to provide ecosystem services-a concept for land-cover based assessments. Landscape Online, 2009, 15: 1-22.
- [ 11 ] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. Ecological Indicators, 2012, 21: 17-29.

- [12] Jacobs S, Burkhard B, Van Daele T, Staes J, Schneiders A. 'The Matrix Reloaded': a review of expert knowledge use for mapping ecosystem services. *Ecological Modelling*, 2015, 295: 21-30.
- [13] Kandziora M, Burkhard B, Muller F. Interactions of ecosystem properties, ecosystem integrity and ecosystem service indicators-A theoretical matrix exercise. *Ecological Indicators*, 2013, 28: 54-78.
- [14] Stoll S, Frenzel M, Burkhard B, Adamescu M, Augustaitis A, Baeßler C, Bonet F J, Carranza M L, Cazacu C, Cosor G L, Díaz-Delgado R, Grandin U, Haase P, Hämäläinen H, Loke R, Müller J, Stanisci A, Staszewski T, Müller F. Assessment of ecosystem integrity and service gradients across Europe using the LTER Europe network. *Ecological Modelling*, 2015, 295: 75-87.
- [15] Goldenberg R, Kalantari Z, Cvetkovic V, Mörtberg U, Deal B, Destouni G. Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2017, 593-594: 599-609.
- [16] 梁友嘉, 徐中民, 钟方雷, 宋晓谕. 基于 LUCC 的生态系统服务空间化研究——以张掖市甘州区为例. *生态学报*, 2013, 33(15): 4758-4766.
- [17] Cai W B, Gibbs D, Zhang L, Ferrier G, Cai Y L. Identifying hotspots and management of critical ecosystem services in rapidly urbanizing Yangtze River Delta Region, China. *Journal of Environmental Management*, 2017, 191: 258-267.
- [18] Li J H, Jiang H W, Bai Y, Alatalo J M, Li X, Jiang H W, Liu G, Xu J. Indicators for spatial-temporal comparisons of ecosystem service status between regions: a case study of the Taihu River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 1008-1016.
- [19] Tao Y, Wang H N, Ou W X, Guo J. A land-cover-based approach to assessing ecosystem services supply and demand dynamics in the rapidly urbanizing Yangtze River Delta region. *Land Use Policy*, 2018, 72: 250-258.
- [20] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 张增祥, 邓祥征. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. *中国科学(D辑)*, 2002, 32(12): 1031-1040.
- [21] 陈江平, 张瑶, 余远剑. 空间自相关的可塑性面积单元问题效应. *地理学报*, 2011, 66(12): 1597-1606.
- [22] 唐秀美, 刘玉, 刘新卫, 潘瑜春, 吴彦彦, 李虹. 基于格网尺度的区域生态系统服务价值估算与分析. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 149-153, 205-205.
- [23] 马昕炜, 曾永年. 基于格网单元的县级土地利用总体规划生态环境影响评价方法与应用. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(10): 1198-1204.
- [24] 阳文锐, 李锋, 王如松, 熊侠仙, 刘安生. 城市土地利用的生态服务功效评价方法——以常州市为例. *生态学报*, 2013, 33(14): 4486-4494.
- [25] 吴健生, 乔娜, 彭建, 黄秀兰, 刘建政, 潘雅婧. 露天矿区景观生态风险空间分异. *生态学报*, 2013, 33(12): 3816-3824.
- [26] 郭椿阳, 高建华, 樊鹏飞, 姚飞. 基于格网尺度的永城市土地利用转型研究与热点探测. *中国土地科学*, 2016, 30(4): 43-51.
- [27] 王雅, 蒙吉军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响. *干旱区研究*, 2017, 34(1): 200-207.
- [28] 高宾, 李小玉, 李志刚, 陈玮, 何兴元, 齐善忠. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析. *生态学报*, 2011, 31(12): 3441-3450.
- [29] 刘世梁, 刘琦, 张兆苓, 邓丽, 董世魁. 云南省红河流域景观生态风险及驱动力分析. *生态学报*, 2014, 34(13): 3728-3734.
- [30] 张骞, 高明, 杨乐, 陈成龙, 孙宇, 王金柱. 1988—2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化. *生态学报*, 2017, 37(2): 566-575.
- [31] 饶恩明, 肖焱, 欧阳志云, 郑华. 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素. *生态学报*, 2013, 33(3): 746-755.
- [32] 李全, 李腾, 杨明正, 应玮. 基于梯度分析的武汉市生态系统服务价值时空分异特征. *生态学报*, 2017, 37(6): 2118-2125.
- [33] Baró F, Gómez-Baggethun E, Haase D. Ecosystem service bundles along the urban-rural gradient: insights for landscape planning and management. *Ecosystem Services*, 2017, 24: 147-159.
- [34] Anselin L. *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [35] 谢花林, 刘黎明, 李波, 张新时. 土地利用变化的多尺度空间自相关分析——以内蒙古翁牛特旗为例. *地理学报*, 2006, 61(4): 389-400.