

湖北省关键生态系统服务供需状况的时空变化研究¹

杨冕¹, 张艺千¹, 王春晓^{2,3}

(1. 武汉大学经济与管理学院, 湖北武汉 430072; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

【摘要】: 生态系统服务是改善自然生态和维持土地可持续利用的关键。该文基于生态系统服务的供需视角, 从时空两个维度量化了城市化过程中生态系统服务的赤字和盈余, 据此提出土地优化利用建议。以湖北省为例, 选取水源涵养、PM₁₀去除、固碳和休闲娱乐 4 种生态系统服务, 评估了 2010~2015 年湖北省生态系统服务供需的盈缺情况及演变过程, 并测算其平衡阈值。结果表明: (1) 除了水源涵养服务供给充足外, PM₁₀去除、固碳和休闲娱乐服务均处于赤字状态; (2) 水源涵养服务的供需趋向平衡, 而 PM₁₀去除、固碳和休闲娱乐服务的供需差异逐步扩大; (3) 各类生态系统服务的供需空间异质性较大; (4) 生态系统服务供需达到平衡所要求的绿地比阈值普遍上升, 建设用地比阈值普遍下降。上述研究对生态系统服务供需的直观量化, 为优化土地管理提供了科学依据; 建议湖北省应重点关注城市化过程中 PM₁₀去除和碳排放控制的问题, 适度增加城市绿地, 合理控制建设用地扩张。

【关键词】: 生态系统服务; 供需平衡; 空间异质性; 平衡阈值

【中图分类号】: X171; F062. 2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2019) 09-2080-12

DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201909007

生态系统服务是生态系统对人类社会提供的直接或间接效用, 是人类直接或间接从生态系统功能中获取的所有产品和服务^[1]。二十一世纪以来, 全球人口不断增长, 社会经济发展突飞猛进, 城市高速扩张。在城市化进程中, 人类通过将自然系统转化为人工、半人工系统, 带来了土地类型和土地覆盖的变化^[2], 成为生态系统服务功能变化的重要驱动力^[3~5]。土地管理是直接和间接影响土地覆盖的最重要因素之一, 有效的土地利用方案必须适应不断增长的人口状况, 维持适当的生态系统服务水平以保障人类健康。开展生态系统服务供需研究对资源优化配置、人地和谐等方面具有重要意义。

有关于生态系统服务的评估被许多学者视为是生态环境管理决策的有效工具, 因为其突出了生态系统服务各功能量的差异性, 根据评估结果可以在多种土地利用方案间相互权衡^[6]。Fisher 等^[7]将生态系统服务中生态系统到人类社会的流向过程划分为供给和收益两个部分。唐秀美等^[8]从生态需求角度出发, 采用多指标条件判定法测度北京市生态需求程度, 并据此划分出 3 个生态分区。谢高地^[9]基于单位面积价值当量因子的生态系统服务的价值化方法, 计算中国各省人均 GDP 和人均生态系统服务价值比, 以此评估生态系统服务对于社会经济需求的稀缺程度。上述研究在评估生态系统服务的过程中引入供需视角, 初步量化了生态

¹收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-07-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (71774122)

作者简介: 杨冕 (1983~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境经济学、能源经济学等方面的研究。

E-mail: yangmian909@163.com

系统服务的供给价值和需求程度，但在空间尺度上未能作出相应的匹配。GIS 技术的成熟，使得在不同空间尺度上评估生态系统服务的供需关系和功能量变为可能。白杨等^[10]将生态系统服务供需关系可视化，以白洋淀流域为例，运用生态系统服务矩阵法和 GIS 空间模拟技术，引入供需比和供给率指标，呈现生态系统服务供给与需求的空间特征。由于生态系统服务供需的测算方法和耦合机制一直未能明确，Chen 等^[11]提出将生态系统服务供需联系起来的框架，量化上海生态系统服务的供需缺口，揭示区域生态系统的平衡门槛，结果显示上海生态系统服务的供需平衡呈现明显的空间异质性。

上述研究进展，推动了生态系统服务的供需评估细化到城市空间一级。城市化减少了固碳^[12]、水保持^[13]和土壤保持^[14]等多种生态系统服务供给，供需变化产生的空间错配易造成地区发展不平衡^[15-17]。鉴于由土地变化带来的生态系统服务变化不易捕捉，大多数生态系统服务供需的评估尚未有效纳入公共部门的土地管理决策。本文以湖北省为研究区域，量化 2010~2015 年各类生态系统服务的供需变化，将供给与需求双方的位置、强度、类型等信息对应纳入生态系统服务的空间量化评估中，进一步识别出不同空间尺度下的供需盈缺，为湖北省土地管理提供优化方案。

1 研究区域

1.1 研究区域概况

湖北省位于中国中部偏南、长江中游，洞庭湖以北（29° 01' 53"~33° 6' 47"N、108° 21' 42"~116° 07' 50"E）（图 1），总面积 18.59 万 km²，大部分地区属亚热带季风性湿润气候，年均气温 17.1℃，年均降水量 1119 mm。全省由山地、丘陵、平原、湖区构成，属长江水系。中南部的江汉平原沿江地区是湖北省经济中心。鄂西、鄂东地区多属高山大川，位于湖北省的四周，交通欠发达，经济发展相对落后。近年来，湖北省城镇化发展迅速，土地利用格局发生巨大变化，出现了城市绿地不足、环境污染、用地紧张、生物多样性降低等一系列问题^[18]。据《2015 年湖北省环境质量状况》显示，2015 年湖北全省 17 个重点城市空气质量均未达到《环境空气质量标准》（GB3095—2012）的二级标准，主要湖泊、水库中劣 V 类同 2014 年相比上升 3.2%。城镇化带来的生态问题不容忽视，人们期望通过土地管理等手段对生态系统服务进行恢复和保育^[19]，为城市发展保驾护航。



图 1 湖北省行政区划图

1.2 数据来源

研究中采用的数据主要包括，土地利用、降水量、植被蒸腾、用水量、人口密度、空气污染浓度、碳排放和城市绿地数据。

土地利用数据 (LUCC) 来源于中国土地利用现状遥感监测数据库 (<http://www.resdc.cn/Login.aspx>), 以 2010 年、2015 年湖北省 Landsat TM/ETM 遥感影像为数据源, 根据研究需要, 将土地划分为耕地、林地、草地、水域、居民地、工业用地和未利用土地 7 种类型, 分辨率为 1km。降水量和人口密度数据来源于中科院资源与环境数据云平台, 植被蒸散蒸腾数据 (ET) 来源于美国国家航空航天局 (NASA) 提供的 MODIS MOD16 遥感产品。湖北省年用水量数据来源于 2010 年、2015 年湖北省水资源公报, 空气污染物浓度数据来源于 2010 年、2015 年《湖北省环境质量状况公告》, 碳排放相关数据来源于《湖北省统计年鉴》、《湖北省“十三五”控制温室气体排放工作实施方案》和《湖北省“十二五”控制温室气体排放工作实施方案》, 城市绿地相关数据来源于《“十二五”生态环境保护规划》和《中国城市统计年鉴》。

2 研究方法

本文基于 costanza^[1]对生态系统服务功能的分类和 Chen 等^[11]关于生态系统服务供需平衡测算方法的研究, 通过构造生态系统服务的供需平衡框架, 选取适当指标量化各类生态系统服务的供给和需求水平, 对湖北省 77 个区县生态系统服务的盈余和赤字进行识别, 以提出合理的土地规划方案和政策建议。

2.1 生态系统服务 (ES) 的供需指标选取原则

(1) 指标的针对性和普适性。本文选择的环境质量标准和政策目标主要来源于我国现行的《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)、世界卫生组织《2005 年空气质量指南》和生态环境保护规划等。

(2) 数据的可得性。生态系统服务供需指标选择既要结合利益相关者诉求, 也要考虑到供需双方指标数据的可得性, 确保后续比较工作及测算分析的进行。

(3) 生态系统服务与居民活动、健康的相关性。为此, 本文结合研究目的选择了 4 个重要的 ES 指标: 水源涵养服务; PM₁₀ 去除服务; 固碳服务; 休闲娱乐服务。

2.2 生态系统服务供给和需求单指标衡量

2.2.1 水源涵养服务

水源涵养服务供给指除去植被的蒸散作用和地表径流使用, 人类从降雨中截留下的可利用水资源, 该储水能力能减少人们对地表径流的使用。水源涵养服务需求由用水量表示, 人类社会对水资源的需求主要体现在农用、工业生产和生活方面, 因此将湖北省的农业用水量、工业用水量、生活用水量分别平均分配给耕地、工业用地和住宅用地。

水供给: $WP_{si} = P_i - ET_i - Runoff_i$

水需求: $WP_{di} = D_{farmingi} + D_{industryi} + D_{livingi}$

式中: WP_{si} 是每个像元 i 的水源涵养服务供给量; P_i 是每个像元 i 的降水量; ET_i 是植被蒸散量; $Runoff_i$ 是每个像元 i 的年平均径流量; 单位统一为 mm; WP_{di} 是每个像元 i 的水源涵养服务需求量; $D_{farmingi}$ 是农业用水量; $D_{industryi}$ 是工业用水量; $D_{livingi}$ 是生活用水量, 将用水量分配到每个像元 i 后, 单位统一为 mm。

2.2.2 PM₁₀ 去除服务

PM₁₀ 去除服务供给主要考虑林地和草地两种贡献植被类型，借鉴 Larondelle 等^[20]的量化方法。当植被对 PM₁₀ 的去除能力超过该区 PM₁₀ 浓度时，PM₁₀ 去除服务供给量等于 PM₁₀ 浓度。当植被对 PM₁₀ 的去除能力小于 PM₁₀ 浓度时，PM₁₀ 去除服务供给量等于 PM₁₀ 去除能力。

PM₁₀ 去除服务的需求以当地政府制定的 PM₁₀ 浓度标准进行判断。当 PM₁₀ 实际浓度高于允许浓度标准时，PM₁₀ 去除服务的需求量为两者之差。反之，需求量为零。

PM₁₀ 供给：

$$PMR_{si} = \begin{cases} R_{ij} \times A_{pixel} & \text{若 } R_{ij} \times A_{pixel} \leq \rho_{pm,districti} \times A_{pixel} \\ \rho_{pm,districti} \times A_{pixel} & \text{若 } R_{ij} \times A_{pixel} > \rho_{pm,districti} \times A_{pixel} \end{cases}$$

PM₁₀ 需求：

$$PMR_{di} = \begin{cases} (\rho_{pm,districti} - PM_{10,permiti}) \times H \times A_{pixel} & \text{若 } \rho_{pm,districti} > PM_{10,permiti} \\ 0 & \text{若 } \rho_{pm,districti} \leq PM_{10,permiti} \end{cases}$$

式中：PMR_{si} 是每个像元 i 的 PM₁₀ 去除服务供给量，单位为 kg；A_{pixel} 表示每个像元大小，为 1 km²；R_{ij} 表示代表第 i 个像元的第 j 类用地对 PM₁₀ 的吸收能力，单位为 kg/km²，本文借鉴 Es-cobedo 等^[21]的研究结果；PMR_{di} 是每个像元 i 的 PM₁₀ 去除服务需求量，ρ_{pm,district i} 表示对应到每个像元 i 的 PM₁₀ 浓度，单位为 kg/m³；H 是估计的大气边界高度，采用 Larondelle 等^[22]估计的 200 m 作为边界层；PM_{10,permit i} 表示允许的 PM₁₀ 浓度，本文选用世界卫生组织 2005 年空气质量指南中规定的 20 ug/m³ 为标准。

2. 2.3 固碳服务

固碳服务的供给主要考虑耕地、林地和草地 3 种土地类型，具体借鉴 Bai 等^[23]的估计方法。固碳服务需求量的估算，采用区域实际碳排放与政府该时期内规定的碳排放标准之差来表示。本文考虑农业、工业和生活 3 种碳排放来源，在空间映射中将农业碳排放量、工业碳排放量、生活碳排放量平均分配给耕地地类、工业用地、住宅用地。

固碳供给：

$$CS_{si} = \begin{cases} 1.63 \times NPP_{ij} \times A_{pixel} + SCS_{ij} & \text{若 } 1.63 \times NPP_{ij} \times A_{pixel} + SCS_{ij} \leq (E_{farmingi} + E_{industryi} + E_{livingi}) \times C_i \\ (E_{farmingi} + E_{industryi} + E_{livingi}) \times C_i & \text{若 } 1.63 \times NPP_{ij} \times A_{pixel} + SCS_{ij} > (E_{farmingi} + E_{industryi} + E_{livingi}) \times C_i \end{cases}$$

固碳需求：

$$CS_{di} = \begin{cases} (E_{farmingi} + E_{industryi} + E_{livingi}) \times C_i - C_{target} & \text{若 } (E_{farmingi} + E_{industryi} + E_{livingi}) \times C_i > C_{target} \\ 0 & \text{若 } (E_{farmingi} + E_{industryi} + E_{livingi}) \times C_i \leq C_{target} \end{cases}$$

式中：CS_{si} 是每个像元 i 固碳服务的供给量，单位为吨；NPP_{ij} 是第 j 类用地第 i 个像元的净初级生产力，具体值参考他人研究结果^[24~26]，单位为 t/km²；A_{pixel} 表示每个像元 i 大小，为 1 km²；SCS_{ij} 表示第 j 类用地第 i 个像元的土壤固碳速率，取自韩冰等^[27]和段晓男等^[28]文章中的值，单位为 t/km²；常数 1.63 是光合作用过程中植被吸收的碳容量。CS_{di} 表示每个像元 i 的固碳服务的需求量，单位是吨；E_{farmingi}、E_{industryi} 和 E_{livingi} 分别代表每个像元 i 里农业、工业和生活碳排放量，单位为万吨标准煤；C_t 是万吨标准煤和碳的转换率，即 0.68；C_{target} 是目标碳排放总量，根据湖北省控制温室气体排放方案中规定的目标能源消费总量计算得出，单位为吨。

2.2.4 休闲娱乐服务

休闲娱乐服务指城市绿地为居民提供游憩休闲场所，该服务的供给量通过区域的绿地面积除以相应分区的面积计算得出，居民对休闲娱乐服务的需求量主要与人口聚集密度相关，用各区人口密度乘以湖北省“十二五”和“十三五”期间对各区人均绿地面积的规划。

绿地供给：RA_{si}=A_{greenspace, partitioni}/A_{partitioni}

绿地需求：RA_{di}=ρ_{populationi}×A_{guidie, greenspacei}

式中：RA_{si} 是每个像元 i 的休闲娱乐服务的供给量，单位 km²/km²；A_{partitioni} 表示湖北省每个像元 i 的绿地面积，单位 km²；A_{partitioni} 代表湖北省每个像元 i 的土地总面积，单位 km²。RA_{di} 是每个像元 i 的休闲娱乐服务的需求量，单位 km²/km²；ρ_{populationi} 表示每个像元 i 的人口密度，单位为人/km²；A_{guidie, greenspacei} 是政府“十三五”期间对人均绿地面积的规划，即 14.6×10⁻⁶ km²/人。

2.3 生态系统服务供需综合衡量指标

在综合衡量生态系统服务的供给和需求时，采用生态供需比和综合生态供需比两个指标。生态供需比（ER）将每种生态系统服务的供给和需求联系起来，通过计算每年每个区县的生态系统服务供给和需求值，衡量其供需盈余或赤字。

$$ER_n = \frac{S_n - D_n}{(S_{n\max} + D_{n\max})/2}$$

式中：S_n 表示第 n 种生态系统服务的供给量，D_n 表示第 n 种生态系统服务的需求量，S_{nmax} 和 D_{nmax} 分别表示 2010 年和 2015 年两期中，第 n 种服务供给量 and 需求量的最大值，即对于每种服务两个时期的分母相同。ER>0 时，生态系统服务盈余，供大于求；ER = 0 时，生态系统服务供需平衡；ER <0 时，生态系统服务赤字，供不应求。

综合供需比（CER）综合了 4 种生态系统服务的供需情况，用于衡量各区县生态系统服务的整体水平，计算得出四类 ER 的算术平均值。

$$CER = \frac{1}{\beta} \sum_{n=1}^{\beta} ER_n$$

式中：β 代表生态系统服务的类数，β=4。n =1 表示水源涵养服务；n =2 表示 PM₁₀ 去除服务；n=3 表示固碳服务；n =4 表

示休闲娱乐服务。

2.4 土地利用对生态系统服务供需平衡的影响

通过 Arcgis 软件将 2010~2015 年土地利用和土地覆盖数据中建设用地和绿地面积值提取至 11 个县域分区,得到湖北省 77 个区县的建设用地比和绿地比。建设用地是指所有不透水面的地类,包括住宅用地和工业用地,建设用地比等于建设用地面积除以该分区土地总面积。绿地指非人工植被区,包括林地和草地,绿地比等于各区县绿地面积除以该区县土地总面积。

$$R_{con} = A_{construction} / A_{district} \quad R_{green} = A_{greenspace} / A_{district}$$

最后,本文运用 Stata15.0 分别对各类生态系统服务的生态供需比 (ER) 和建设用地比 (R_{con})、生态供需比 (ER) 和绿地比 (R_{green}) 进行了最小二乘回归,得出了二者的相关性和趋势线。通过回归方程结果进一步计算得到政府土地规划的空间门槛值,进一步优化各区县的建设用地和绿地分配。

3 结果与分析

3.1 分指标分析

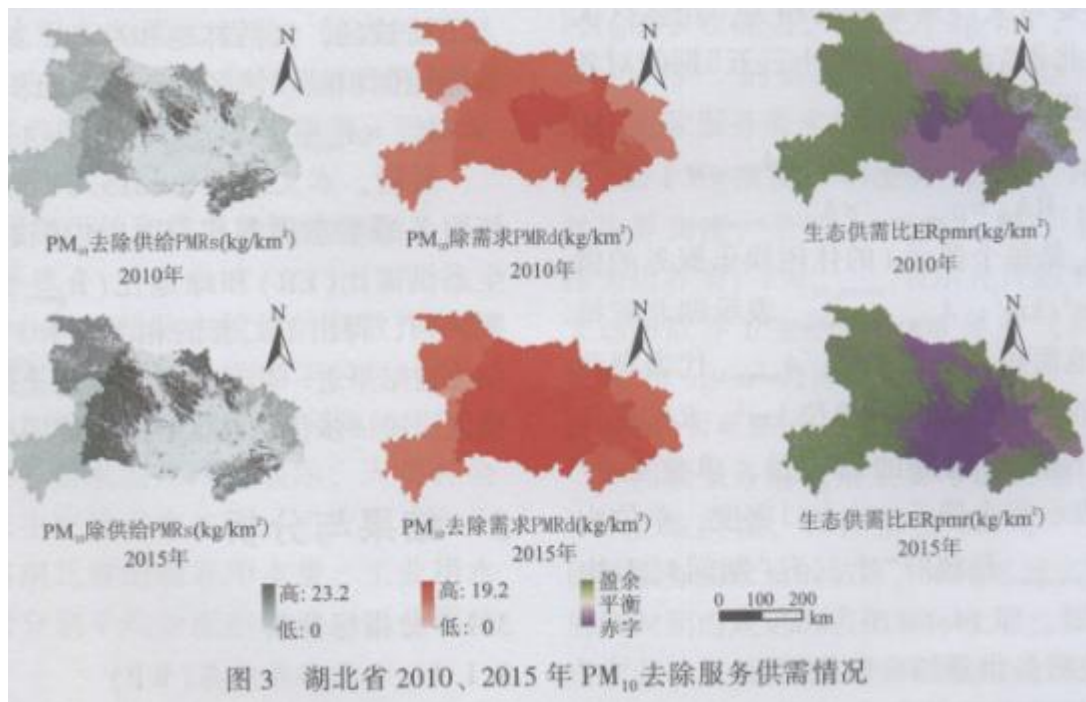
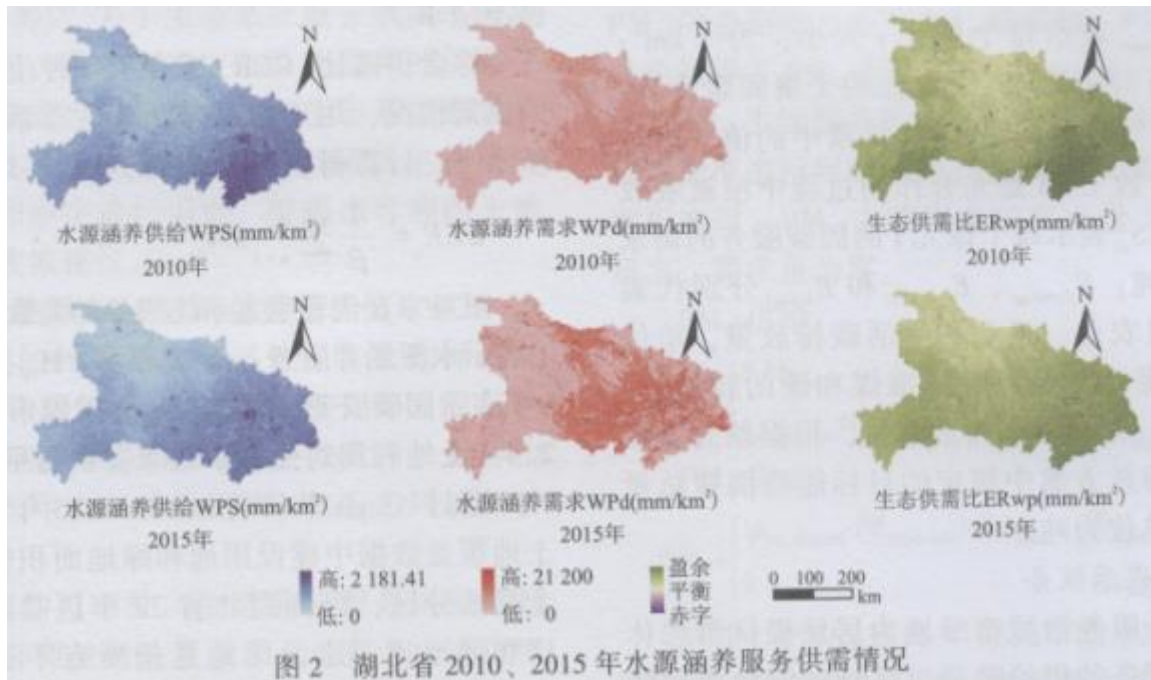
3.1.1 水源涵养服务 (WP)

整体来看,湖北省的水源涵养服务供给量下降(图 2 所示),由 2010 年的 1 074.55 亿 m^3 下降至 2015 年的 994.77 亿 m^3 ,降幅为 7.42%。同期,水源涵养服务需求量呈上升趋势,增幅为 2.61%。2010~2015 年湖北省水源涵养服务供给量远大于需求量,2010 年和 2015 年供给盈余分别为 788.19 亿 m^3 和 700.95 亿 m^3 ,尽管盈余水平下降,湖北省 77 个区县中仅有襄阳市和老河口市处于赤字状态,水源涵养服务供给仍然能够满足当地的生产生活需要。

从时空分布来看,中心市区的水源涵养服务(WP)出现供需不匹配现象。2010~2015 年湖北省水源涵养服务供给与湖泊水体分布呈现一致性,需求分布与人口密集城区相吻合。相比 2010 年,以武汉、咸宁为代表的东南部经济发达区水源涵养服务供给量在 2015 年显着减少。综合来看,水源涵养服务供需状况趋于平衡,“高供给低需求”型地区和“低供给高需求”型地区范围缩小,净供给和供需均衡地区增多。

3.1.2 PM₁₀ 去除服务 (PMR)

湖北省 PM₁₀ 去除服务在 2010 年、2015 年总体处于赤字水平(图 3 所示)。2010 年湖北省 PM₁₀ 去除供给量约为 1 644.62 t,需求量约为 2 451.29 t,供需缺口为 806.67 t,2015 年缺口进一步扩大至 2 832.44 t。供需缺口的增大表明现有的 PM₁₀ 去除服务供给已经无法满足其社会需求。

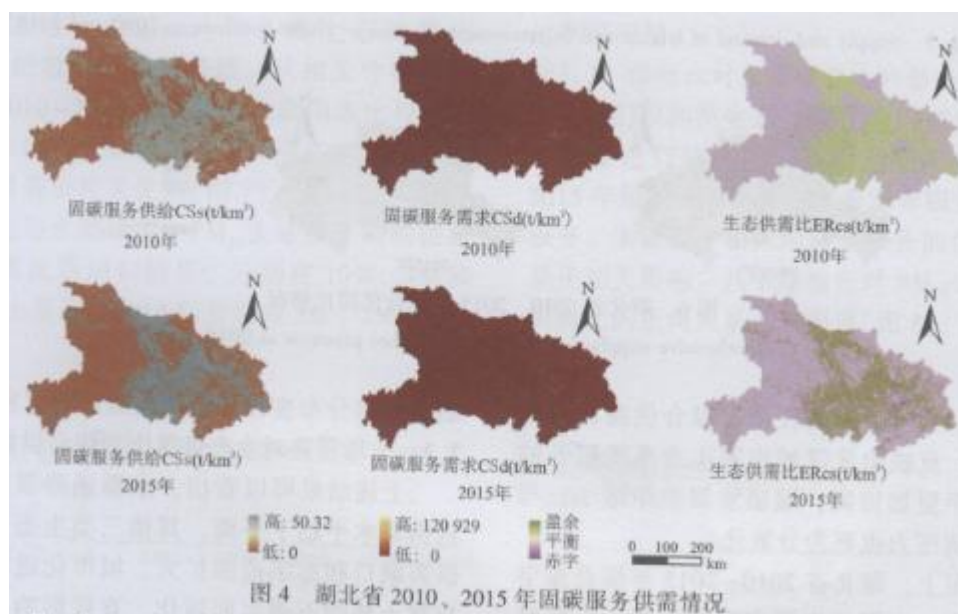


PM₁₀去除服务的供需时空错配现象突出。2010~2015 年十堰、襄阳、宜昌、荆门、随州和黄冈等区域 PM₁₀去除服务的供给和需求量增长，其中需求量增长更为显著，高需求区域由武汉、荆门、孝感扩大至武汉、荆门、荆州、孝感、随州、襄阳和宜昌等地区。从测算结果可以看出，高供给地区主要位于湖北四周和神农架林区，高需求地区主要集中在湖北中部发达城区，由中心向四周扩散。供需错配致使湖北中部和东南地区 PM₁₀去除服务的赤字程度加深，城郊赤字地区也随之增多。

3.1.3 固碳服务 (CS)

2010~2015 年湖北省固碳服务总需求远高于总供给（图 4 所示），2010、2015 年固碳服务供给量分别为 282.26 和 317.04 万 t，增幅达 12.32%。2010 和 2015 年需求量分别为 7553.64 和 7776 万 t，增幅为 2.94%。湖北省 2010~2015 年固碳服务供需缺口扩大，赤字程度加深。

综合来看，湖北省固碳服务供需的空间分布差异明显。2010 和 2015 年固碳服务供给量小幅增加，整体分布范围较一致。相比供给，同期固碳服务的需求量大幅上升，高需求范围扩大，仅有东南和西南部的局部区域固碳需求量下降。以武汉城市圈为首的中心城区固碳服务严重供不应求，赤字区域由“一圈两区”向省内四周扩散。2010~2015 年湖北省固碳服务的盈余区净供给量增加、赤字区缺口加深，各区域供需错配问题更加突出。



3.1.4 休闲娱乐服务 (RA)

从测算结果来看，2010~2015 年各区县的休闲娱乐服务供给总量持续高于需求总量（图 5 所示），总体满足居民需求。然而实际上，神农架林区承担了大部分的休闲绿地供给，2010 年和 2015 年神农架林区休闲娱乐服务的供给量，占湖北省总供给量的比例高达 49.09% 和 58.1%。全省赤字区县在 2010~2015 年间由 69 个上升至 72 个。

从空间分布来看，除个别地区（神农架林区和武汉市部分区域）供给过剩，湖北省大部分区域的休闲娱乐服务处于供不应求的状态。2010~2015 年湖北中部宜昌、荆门、孝感和荆州等地休闲娱乐服务供给增加，十堰、随州和咸宁等地供给减少。围绕武汉城市圈、宜昌-荆州组合都市圈和襄阳都市圈的“一圈两区”显现出高需求特征，高需求区与人口密集区分布相吻合。值得关注的是，2015 年随州市、广水市和房县部分区域休闲娱乐服务由净供给转为赤字。休闲娱乐服务的净供给区域，围绕着武汉城市圈分布，供需状态呈现边缘高供给、中心高需求的特征。

3.2 综合指标分析

综合四类服务的供需情况，我们得出湖北省 2010~2015 年生态系统服务的综合供需比结果（图 6 所示）。2010 年湖北省综合供需情况整体供大于求，2015 年整体供不应求，神农架林区在 2010 年和 2015 年综合净供给值最高，武汉市市辖区综合净供给值最低。2010~2015 年综合供需比的两极差距趋于缓和，部分高需求地区，如武汉市市辖区、天门市和潜江市等综合供需比的赤字程度减轻，反映出武汉城市圈生态系统服务的综合供需水平更加协调，城镇发展差距缩小，与之相关的环境压力也更为分

散化。

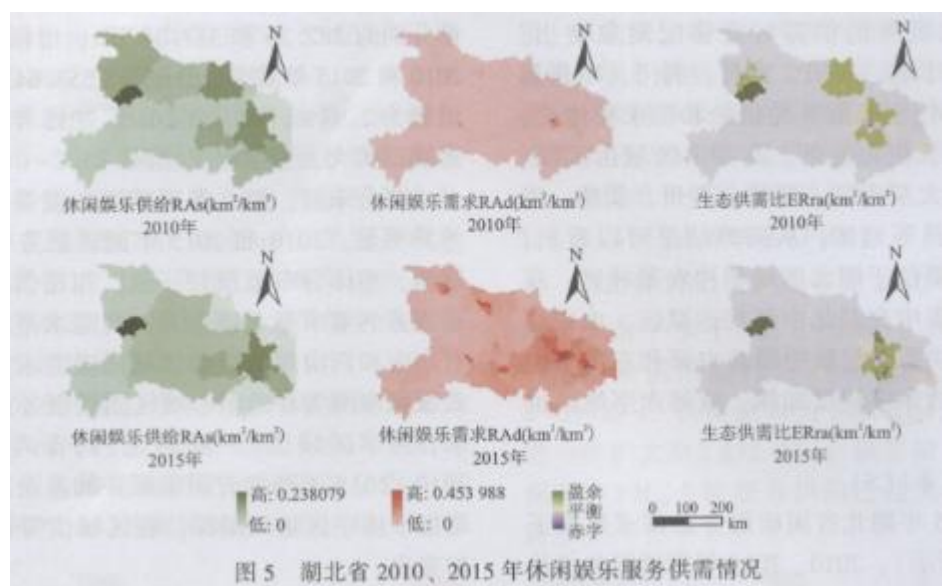


图 5 湖北省 2010、2015 年休闲娱乐服务供需情况



图 6 湖北省 2010、2015 年综合供需比情况

时空分布上，湖北省 2010~2015 年综合赤字区域范围扩大，由湖北中部向南部扩张。长江经济带部分地区，包括咸宁市辖区、赤壁市和武穴市等生态供需情况由盈余转向赤字，而长江经济带其他地区普遍处于赤字状态。这反映出，湖北省生态系统服务的综合供需水平与区域发展规划、人口分布变化和城市发展情况紧密相关。

3.3 土地覆盖对生态供需比和综合供需比的影响

上述结果可以看出，水源涵养服务供给充足且供需水平趋于平衡，其他三类生态系统服务的供需缺口和赤字范围扩大。城市化进程中人类对自然土地的不透水面转化，直接影响到绿地和建设用地的覆盖分布。因此本文进一步研究了建设用地变化和绿地变化对生态供需比的影响（回归结果如下表 1、表 2），并以此为依据计算出各类生态系统服务的平衡阈值。

表 1 2010 年建设用地比和绿地比与各类生态供需比回归结果

变量	(1) 水源涵养	(2) 水源涵养	(3) PM ₁₀ 去除	(4) PM ₁₀ 去除	(5) 固碳	(6) 固碳	(7) 休闲娱乐	(8) 休闲娱乐
绿地比	0.118*** (0.0323)		0.303 (0.0424)		0.124 (0.0772)		0.113* (0.0576)	
建设用地比		-4.275* (2.516)		-14.71*** (3.641)		-29.21*** (4.640)		-3.212 (4.298)
常数项	0.0989***	0.168***	-0.228***	-0.0391*	-0.138***	0.0119	-0.0379	0.0255

	(0.018 6)	(0.013 8)	(0.024 5)	(0.020 0)	(0.044 5)	(0.025 5)	(0.033 2)	(0.023 6)
样本数	77	77	77	77	77	77	77	77
拟合度	0.151	0.037	0.406	0.179	0.033	0.346	0.049	0.007

***、**、*分别表示在 1%、5%、10%的水平上显著。

表 2 2015 年建设用地比和绿地比与各类生态供需比回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	水源涵养	水源涵养	PM ₁₀ 去除	PM ₁₀ 去除	固碳	固碳	休闲娱乐	休闲娱乐
绿地比	0.053 7 (0.0331)		0.336 (0.0418)		0.101 ** (0.0469)		0.116* (0.0647)	
建设用地比		-0.431 ** (0.199)		-1.168 *** (0.321)		-0.670 ** (0.284)		-0.393 (0.401)
常数项	0.112 *** (0.019 0)	0.159 *** (0.014 7)	-0.263*** (0.024 1)	-0.045 9 * (0.023 7)	-0.129 *** (0.027 0)	-0.047 9 ** (0.021 0)	-0.041 3 (0.037 3)	0.032 9 (0.029 6)
样本数	77	77	77	77	77	77	77	77
拟合度	0.034	0.059	0.463	0.150	0.058	0.069	0.041	0.013

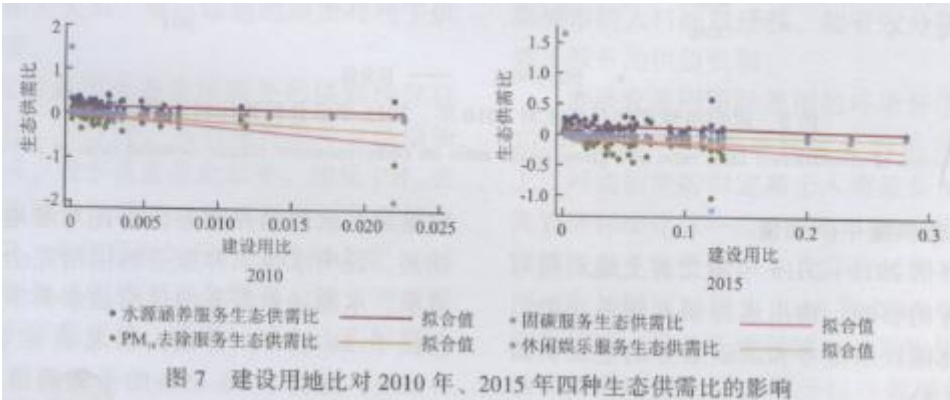
注：***、**、*分别表示在 1%、5%、10%的水平上显著。

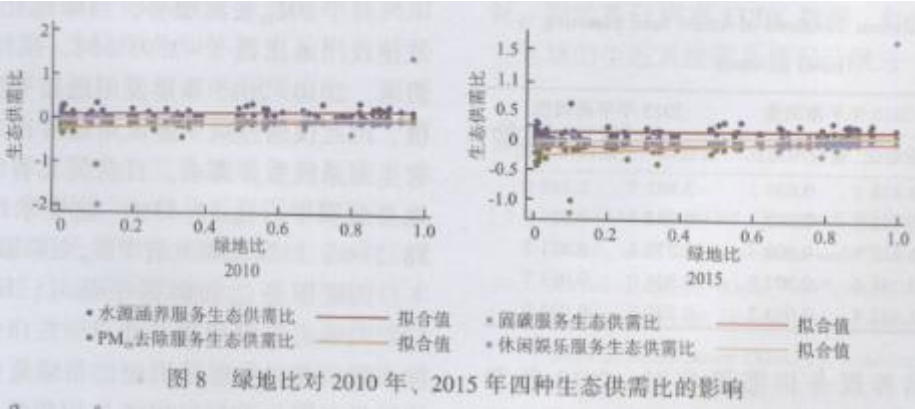
3.3. 1 建设用地比对生态供需比的影响

根据回归结果，我们绘制了建设用地比(Rcon)、绿地比(Rgreen)和各类生态供需比(ER)之间的散点图及趋势线。从相关性检验可以看出，2010~2015 年湖北省建设用地比与水源涵养服务、PM₁₀去除服务、固碳服务的生态供需比普遍呈显著负相关关系（图 7）。其中，2010 年建设用地比与水源涵养、PM₁₀去除服务和固碳服务生态供需比的回归结果，分别在 10%、1%和 1%的水平上显著。2015 年分别在 5%、1%和 5%的水平上显著。因此，研究结果验证了湖北省建设用地的扩张会带来水消耗、粉尘扩散和碳排放过剩等问题。

3.3. 2 绿地比对生态供需比的影响

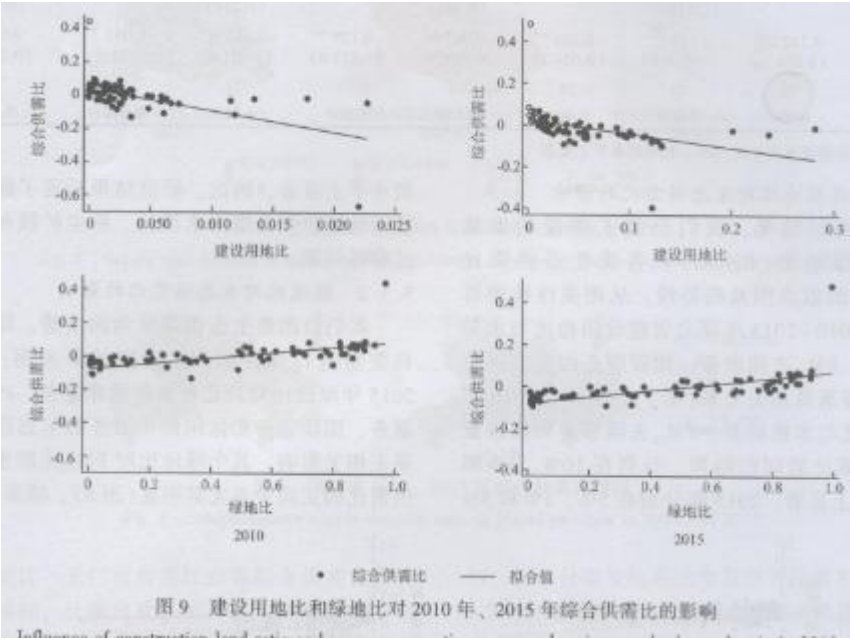
我们以四类生态供需比为因变量、绿地比为自变量进行线性回归，研究结果表明：2010~2015 年绿地比对湖北省水源涵养服务、PM₁₀去除服务、固碳服务和休闲娱乐服务的生态供需比均呈正相关影响。其中绿地比对 PM₁₀去除服务生态供需比的正向关系尤其明显（图 8），结果具有 1%的显著水平，说明增加绿地占比能有效地抑制空气粉尘，是平衡区域生态关系的关键。





3. 3. 3 建设用地比和绿地比对综合供需比的影响

根据回归结果可知，2010~2015 年湖北省建设用地比与呈显著负相关关系（图 9），绿地比和综合供需比在“十二五”期间呈正向关系，结果均显示在 1%的水平上显著。同时，从相关系数来看，每增加 1 单位建设用地比对综合供需比的负向影响程度高于每增加 1 单位绿地比对综合供需比的正向影响程度。2010 年，每提高 1 单位综合供需比，需要增加 6.06 单位的绿地比或者减少 0.08 单位的建设用地比。2015 年，每单位综合供需比的增加，需增加 6.58 单位的绿地比或者减少 1.5 单位的建设用地比。



3. 4 各类生态供需平衡阈值

进一步评估 2010~2015 年湖北省土地利用对生态系统服务的影响，得出水源涵养服务、PM₁₀去除服务、休闲娱乐服务和固碳服务的生态供需平衡阈值（表 3）。

指标	2010 年平衡阈值		2015 年平衡阈值	
	绿地比	建设用地比	绿地比	建设用地比

水源涵养	-0.838 1	0.039 3	-2.085 7	0.368 9
PM ₁₀ 去除服务	0.752 5	-0.002 7	0.782 7	-0.039 3
固碳服务	1.112 9	0.000 4	1.277 2	-0.071 5
休闲娱乐服务	0.335 4	0.007 9	0.356 0	0.083 7
综合供需	0.462 4	0.003 2	0.537 6	0.036 9

当水源涵养服务供需平衡时，2010年和2015年的绿地比平衡阈值均为负数，根据前文回归结果，水源涵养服务供需比与绿地比呈显著正相关，说明水源涵养服务的供给完全可以满足其需求。水源涵养服务的供给盈余要求建设用地占比低于36.89%。目前，湖北省建设用地比为3.83%，远低于36.89%的平衡阈值，因此湖北省水源涵养供给总体来看比较充足。

对于PM₁₀去除服务，当绿地比高于78.27%或建设用地比低于-3.93%时，供给可以满足其需求。2010~2015年建设用地比平衡阈值均为负值，因此仅通过减少建设用地占比无法满足湖北省生态系统服务需求。目前湖北省绿地面积在土地总面积中占比53.43%，这要求绿地比增加至78.27%，以实现湖北省PM₁₀去除服务供需平衡。

固碳服务达到供需平衡时，绿地比需高于127.72%或建设用地比低于-7.15%。从现实角度来看，湖北省建设用地比和绿地比均无法达到该门槛，因此2010~2015年固碳服务的供需始终处于赤字状态。

湖北省休闲娱乐服务实现供需平衡需满足绿地比高于35.6%或建设用地比低于8.37%，当前湖北省绿地比为53.43%，建设用地占比为3.83%，休闲娱乐服务总体处于盈余状态。然而，由于神农架林区、武汉市市辖区实际承担了绝大部分绿地供给，休闲娱乐服务回归结果不显著。因此，湖北省其他分区绿地比实际应该普遍低于该门槛。

4 结论与讨论

本文以湖北省为研究区，通过构建生态系统服务的供需平衡指标体系，对湖北省77个区县的四类生态系统服务供需水平及空间协调度进行评估，得到以下结论：

（1）湖北省生态系统服务供需水平整体呈下降趋势，除水源涵养服务供给基本满足社会需求，PM₁₀去除服务、固碳服务和休闲娱乐服务均存在短缺情况。2010-2015年间，受城市化影响，襄阳市市辖区、武汉市市辖区等湖北长江经济带城市，建设用地扩张与生态系统服务供需水平间呈现负相关关系，城市绿地的增加有利于供需协调的改善。

（2）湖北省各类生态系统服务的供需情况存在差异。2010~2015年，水源涵养服务总供给始终高于总需求，处于高度盈余水平。相反PM₁₀去除服务、固碳服务供需缺口五年间分别扩大3.5、1.03倍，赤字程度加深。尽管湖北省2015年休闲娱乐服务总体处于盈余状态，除去神农架林区的绿地贡献程度后，赤字区域占比实际高达80.52%。

（3）各类生态系统服务的供需分布呈现不同的特点。水源涵养服务的供给区主要集中在湖泊水体流经地，PM₁₀去除服务和休闲娱乐服务的供给主要集中在神农架林区和省内四周山区，固碳服务的高供给区域包括宜昌市、襄阳市、咸宁市等，呈环状分布。四类生态系统服务的高需求地区相似，由“一圈两区”向湖北省四周辐射分布。

研究从利益相关者视角对湖北省生态系统服务供给和需求进行了定义和量化，基于GIS技术评估湖北省4个关键生态系统服务指标的供需空间变化，提高了数据的精度和结果的准确性。结果表明，湖北省除了水源涵养服务，其他生态系统服务在空间供需上显示出或多或少的不匹配现象，特别是在市中心反映出深度赤字。通过生态系统服务供需的空间显示量化，土地管理者可以观察到各类生态系统服务错配的具体位置，从而针对过剩和短缺地区进行土地管理调整，因此本文提出以下几条政策建

议:

(1) 襄阳市和老河口市是湖北省水源涵养服务中唯二的两个赤字区域, 政府应调整其土地规划走向, 避免供水短缺情况进一步恶化, 考虑运用增加植被和节水控制等多种方式调配用水, 改善其赤字情况。

(2) 绿地能有效吸附部分 PM_{10} ^[21' 29], 湖北省政府在增加绿地比例的同时要减少建设用地比, 才能达到 PM_{10} 的浓度控制目标。

(3) 土壤和绿地对碳的吸收能力不同, 固碳作用有限。除了土地管理调整, 政府还必须控制二三产业的 CO_2 排放。大部分的碳排放和固碳需求来源于湖北长江经济带和两圈地区, 相关企业应提高技术效率, 承担起减排的责任。

(4) 随着土地开发程度越高, 人口越密集的城市对绿地的需求越大。湖北省政府在加强城市绿化度的同时, 以政策利好为导向, 鼓励人口密集城市的人口疏散迁移, 能有效分散各区县休闲娱乐服务的供给负担。

本研究采用国际通用的环境标准衡量湖北省 2010~2015 年生态系统服务的供需盈缺。事实上, 环境标准的制定基于人类最低生存目标, 距离宜居标准还有一定差距, 以该目标为衡量尺度测算生态系统平衡, 本身存在局限。同时, 本文所选取的研究时段为 2010 和 2015 年, 研究时段间隔较近, 借此反映区域生态系统服务供需状况演变趋势略显牵强。限于以往数据的可获得性, 文章有待继续挖掘延伸, 未来拟采用 2020 年最新一期的高分辨率 LUCC 数据, 针对湖北省及其它地域的生态系统服务情况开展进一步的研究。

参考文献 :

[1] COSTANZA ROBERT, D' ARGE RALPH, de GROOT RU-DOLF, et al. The value of the world, s ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 6630(387) : 253-260.

[2] WANG ZHIFANG. Evolving landscape-urbanization relation-ships in contemporary China [J]. Landscape and Urban Plan-ning, 2018, 171: 30-41.

[3] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 等. 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, 2016, 36(15): 4881-4891. SUN Z Y, LIU Z F, HE C Y, et al. Multi-scale analysis of eco- system service tradeoff in China' s rapidly urbanizing arid re-gions : A case study of hubao and eyu regions[J]. Acta ecolog-ica sinica, 2016, 36(15) : 4881-4891.

[4] 虎陈霞, 郭旭东, 连纲, 等. 长三角快速城市化地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以嘉兴市为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 333-340. HU C X, GUO X D, LIAN G, et al. Effects of land use change on ecosystem service value in rapidly urbanized areas of the Yangtze river delta: A case study of jiaxing city[J]. Resources and environment in the Yangtze river basin, 2017, 26(3) : 333-340.

[5] 马程, 王晓玥, 张雅昕, 等. 北京市生态涵养区生态系统服务供给与流动的能值分析 [J]. 地理学报, 2017, 72(6) : 974-985. MA C, WANG X Y, ZHANG Y X, et al. Energy analysis of e-cosystem service supply and flow in Beijing ecological conserva-tion area[J]. Journal of geographical, 2017, 72(6): 974-985.

[6] GOLDSTEIN J. H, CALDARONE G, DUARTE T. K, et al. In-tegrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(19) : 7565-7570.

[7] FISHER BRENDAN, TURNER R. KERRY, MORLINGPAUL. Defining and classifying ecosystem services for decision making[J]. Ecological Economics, 2009, 68(3) : 643-653.

[8]唐秀美, 郝星耀, 潘瑜春, 等. 基于生态需求评价的北京市生态区位划分研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 170-176. TANG S M, HAO X Y, PAN Y C, et al. Research on ecological location division of Beijing based on ecological demand assessment [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 170-176.

[9]谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 生态系统服务的供给、消费和价值化[J]. 资源科学, 2008(1): 93-99. XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. The supply, consumption and value of ecosystem services [J]. Resources science, 2008(1) : 93-99.

[10]白杨, 王敏, 李晖, 等. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5846-5852. BAI Y, WANG M, LI H, et al. Theory and management of eco-system service supply and demand[J]. Acta Ecologica sinica, 2017, 37(17) : 5846-5852.

[11]CHEN JUNYU, JIANG BO, BAI YANG, et al. Quantifying e-cosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimisation [J] . Science of the Total Environment, 2019, 650: 1426-1439.

[12]TAO YU, LI FENG, WANG RUSONG, et al. Effects of land use and cover change on terrestrial carbon stocks in urbanized areas: a study from Changzhou, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 651-657.

[13]JIA X. Q, FU B J, FENG X. M, et al. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China[J]. Ecological Indicators, 2014, 43:103-113.

[14]YANG BAI ZHIYUN OUYANG HUA. Modeling soil conservation, water conservation and their tradeoffs : A case study in Beijing[J]. Journal of Environmental Science, 2012, 24(3): 419-426.

[15]LI JINGHUI, JIANG HONGWEI, BAI YANG, et al. Indicators for spatial-temporal comparisons of ecosystem service status between regions : A case study of the Taihu River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2016, 60: 1008-1016.

[16]PALOMO IGNACIO, MARTÍN-LÓPEZ BERTA, POTSCHINMARION, et al. National Parks, buffer zones and surrounding lands : Mapping ecosystem service flows [J]. Ecosystem Services, 2013, 4: 104-116.

[17]KROLL FRANZISKA, MULLER FELIX, HAASE DAGMAR, et al. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics [J] . Land Use Policy, 2012, 29 (3): 521-535.

[18]程建, 程久苗, 吴九兴, 等. 2000~2010年长江流域土地利用变化与生态系统服务功能变化[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6) : 894-901. CHENG J, CHENG J M, WU J X, et al. Land use change and ecosystem service function change in the Yangtze river basin from 2000 to 2010[J]. Resources and environment in the Yangtze river basin, 2017, 26(6) : 894-901.

[19]李佳鸣, 冯长春. 基于土地利用变化的生态系统服务价值及其改善效果研究——以内蒙古自治区为例[J]. 生态学报, 2019(13) : 1-9. LI J M, FENG C C. Study on ecosystem service value and improvement effect based on land use change :

A case study of In-ner Mongolia autonomous region [J] . Acta Ecologica Sinica, 2019(13) : 1-9.

[20]LARONDELLE NEELE, LAUF STEFFEN. Balancing demand and supply of multiple urban ecosystem services on different spa-tial scales[J]. Ecosystem Services, 2016, 22: 18-31.

[21]ESCOBEDO FRANCISCO J, NOWAK DAVID J. Spatial heter-ogeneity and air pollution removal by an urban forest[J]. Land-scape and Urban Planning, 2009, 90(3-4) : 102-110.

[22]NEELE L, NIKI F, DAGMAR H. Mapping transition potential with stakeholder- and policy-driven scenarios in Rotterdam City[J]. Ecological Indicators, 2016, 70: 630-643.

[23]BAI YANG, WONG CHRISTINA P, JIANG BO, et al. Develo-ping China' s Ecological Redline Policy using ecosystem serv-ices assessments for land use planning[J]. Nature Communica-tions, 2018, 9(1).

[24]徐昔保, 杨桂山, 李恒鹏. 太湖流域土地利用变化对净初级生产力的影响[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1940-1947. XU X B, YANG G S, LI H P. The impact of land use change on net primary productivity in taihu lake basin[J]. Resources science, 2011, 33(10) : 1940-1947.

[25]王原, 黄玫, 王祥荣. 气候和土地利用变化对上海市农田生态系统净初级生产力的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3) : 641-648. WANG Y, HUANG M, WANG X R. Effects of climate and land use change on net primary productivity of farmland ecosys-tem in Shanghai[J] . Journal of environmental science, 2010, 30(3) : 641-648.

[26]陈福军, 沈彦俊, 李倩, 等. 中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究[J]. 地理科学, 2011, 31(11): 1409-1414. CHEN F J, SHEN Y J, LI Q, et al. Study on the spatial and temporal changes of terrestrial ecosystems in China in the past30 years [J]. Geographical science, 2011, 31(11) : 1409 -1414.

[27]韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008(2): 612-619. HAN B, WANG X K, LU F, et al. Current situation and poten-tial of carbon sequestration in farmland soil ecosystem in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008(2) : 612-619.

[28]段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008(2): 463-469. DUAN X N, WANG X K, LU F, et al. Current situation and potential of carbon sequestration in wetland ecosystems in China[J]. Acta ecologica sinica, 2008(2) : 463-469.

[29]刘宇, 王晓立, 韩浩章, 等. 城市绿地空气 PM10 浓度及其与环境因子的关系[J]. 南方农业学报, 2015, 46(8): 1469-1473. LIU Y, WANG X L, HAN H Z, et al. Urban green space airPM10 concentration and its relationship with environmental factors[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46 (8): 1469-1473.