

DOI: 10.5846/stxb201807251586

刘颂, 杨莹, 王云才. 基于矩阵分析的水文调节服务供需关系时空分异研究——以嘉兴市为例. 生态学报, 2019, 39(4): - .

Liu S, Yang Y, Wang Y C. Mapping supply and demand differentiation of hydrological regulation service based on matrix analysis: a case study of Jiaxing city, Zhejiang province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): - .

基于矩阵分析的水文调节服务供需关系时空分异研究 ——以嘉兴市为例

刘 颂^{1,*}, 杨 莹¹, 王云才¹

同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092

摘要: 生态系统服务供需关系的识别、度量、空间化分析对自然资源合理配置有重要的意义。以嘉兴市为研究区, 以 2005 年 Landsat7 ETM+影像和 2015 年 Landsat8 OLI 传感器影像为数据源, 采用生态系统服务供需关系矩阵法, 分析嘉兴市水文调节服务供给能力与需求水平的时空分异特征。结果表明: (1) 2005—2015 年 10 年间, 嘉兴市处于快速城市化阶段, 土地利用变化明显, 建设用地显著增加, 水域、水田面积有所增加, 旱地、园地、林地大量减少。(2) 土地利用变化是影响水文调节服务供需关系的主要因素, 研究发现嘉兴市大部分地区水文调节服务处于供不应求的状态。(3) 随着建设用地的不断扩张, 导致水文调节服务供需矛盾加剧, 供不应求区域由中心城区向城市边缘区扩大。(4) 水文调节服务需求区域的变化与人类活动密切相关, 供给区域受制于自然环境的数量与质量, 生态系统服务供给与需求存在错位, 促进了生态系统服务流的产生, 并需要政策引导。

关键词: 生态系统服务矩阵; 供需关系; 时空分异; 水文调节服务; 嘉兴市

Mapping supply and demand differentiation of hydrological regulation service based on matrix analysis: a case study of Jiaxing city, Zhejiang province

LIU Song^{*}, YANG Ying¹, WANG Yuncai¹

College of Architecture and Urban Planning Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Ecosystem provides supporting services, regulating services, provisioning services and cultural services, which have great significance to human well-being and the sustainable development of society. However, the supply and demand of ecosystem services often mismatched in the same region due to the characteristics of spatial and temporal differentiation. Therefore, it is very important for the rational allocation of natural resources when we identify, measure and do spatial-analysis of supply and demand of ecosystem services. Taking Jiaxing City as study area, we used 2005 Landsat7 ETM+ image and 2015 Landsat8 OLI sensor images as the data sources. The ecosystem service matrix method was used to analyze the spatial-temporal differentiation characteristics of supply and demand of the hydrological regulation service (HRS). The following were the analysis results: (1) Jiaxing City was in the stage of rapid urbanization with the significant change of land use/land cover (LULC) from 2005 to 2015, of which constructed areas has increased significantly; water area and paddy area increased, whereas other land area decreased. (2) LULC change was one of the main factors affecting the relationship of supply and demand of the HRS. In this study, we determined that HRS was deficient in most areas of Jiaxing City. (3) With the continuous expansion of built-up areas, the contradiction between supply and demand of HRS has intensified. The shortage supply areas of HRS have expanded from the central city to the urban fringe. (4) Changes in the demand area of HRS were closely related to human activities. The ability of supply areas was subject to the quantity and

基金项目: 国家重点研发计划课题 (No.2017YFC0505705); 住房和城乡建设部科学技术计划项目 (编号 2018-K2-021)

收稿日期: 2018-07-25; **修订日期:** 2018-12-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusong5@tongji.edu.cn

quality of the natural environment. The flow of ES from supply unit to demand unit was promoted because of the mismatch between the supply and demand of ecosystem services. Policy guidance was important to protect the ecological source, restore and reconstruct the damaged ES flow.

Key Words: ecosystem service matrix; supply and demand; spatial-temporal differentiation; hydrological regulation services; Jiaxing City

生态系统服务是国内外研究的热点,近年来,生态系统服务研究由价值评估向着更加重视生态系统服务对人类福祉的影响、更加重视生态系统服务的区域差异性和跨越空间尺度的关联、更加重视生态系统服务的动态演化和时间耦合特性等方向演进^[1],生态系统服务研究成果应用也由生物多样性保护,逐步向资源与环境管理、区域规划、可持续发展等领域发展^[2]。生态系统服务受生态效应与地理过程的影响,具有时空分异特征^[3-6],即同一地区生态系统服务供给与需求往往呈现空间错位。可见,对生态系统服务的供给和需求进行识别、度量、空间化分析对自然资源合理配置有重要的意义。

但是,已有的研究大多侧重于生态系统服务的供给研究^[7-10],而关于人类对生态系统服务的需求测度研究及供需关系研究较少。在将生态系统服务供需关系空间化的 5 种分析方法中^[11],除了专家经验判别法,其他方法因对详细的基础数据过分依赖而难以实现。作为专家经验判别法的一种,Burkhard 提出的“生态系统服务供需关系矩阵法”^[12]已经成功应用于国内外生态系统服务的量化以及空间化的研究中。如 Nedkov 和 Burkhard^[13]以矩阵法为基础测算了保加利亚 Malki Iskar 河流域地区洪水调节服务的供需状况,发现水文调节服务供给与需求存在严重的空间错位。Kroll 和 Müller^[14]通过生态系统服务供需关系矩阵研究了德国东部 Leipzig - Halle 地区 1990 年至 2007 年能源的供给与需求变化。白杨等^[15]基于矩阵法计算了白洋淀地区的生态系统服务的供给率和供需比,证明流域生态系统服务处于盈余状态。目前国内关于生态系统服务的供需关系研究逐渐受到重视,以理论研究和空间分异的研究为主^[16-19],而应用矩阵法进行时空分异的综合研究较少。

基于此,本研究以嘉兴市为研究区,通过建立生态系统服务供需关系矩阵,分析生态系统服务(尤其是水文调节服务)变化(供给)对人类福利(需求)的影响机制,在识别生态系统服务供需关系时空分异特征的基础上,划分嘉兴市生态系统服务管控类型,并提出发展引导策略和规划建议,为空间发展引导和规划提供依据。

1 研究区概况

嘉兴市位于浙江省东部,属杭嘉湖平原地区,位置介于 30°21'—31°02'N、120°18'—121°16'E 之间,辖两区五县(市)(南湖区、秀洲区、海宁市、平湖市、桐乡市、嘉善县、海盐县)。截止 2015 年,嘉兴市陆域总面积 4222.9 km²,户籍人口 349.48 万人,常住人口 458.5 万人。

嘉兴市境内地形平坦,水域面积占区域总面积的 9.34%,河道交错,湖荡众多,京杭运河穿境而过。地处北亚热带南缘,属东亚季风区,年平均气温 15.7℃,年平均降水量 1168.6 mm,蒸发量 1313 mm。特殊的自然地理环境导致该地区洪涝、台潮、渍害严重。

嘉兴市位于城市化发展速度最快的太湖流域中心地带^[20],快速的城市化导致嘉兴市土地利用及河湖水系的剧烈变化,城市水文过程与功能发生巨大改变,城市下垫面构成改变、水网密度降低等变化使水文调节服务不断退化,引发洪涝灾害^[21]。本文重点研究 2005—2015 年 10 年间嘉兴市水文调节服务的时空分异特征,揭示城市发展对水文调节服务的影响。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

研究使用的数据包括嘉兴市土地利用数据、土壤数据、气象数据、水文数据、社会经济数据等。获取覆盖

嘉兴市的 2005 年 Landsat7 ETM+影像和 2015 年 Landsat8 OLI 传感器影像,将原始影像进行真彩色合成,通过融合、镶嵌等处理后,形成最终影像成果,分辨率为 15m。结合《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010—2017),将嘉兴市土地划分为耕地、林地、园地、水域、建设用地和其他土地 6 种一级类型,并建立相应的二级分类体系(表 1)。经过目视解译,获得嘉兴市土地利用图(图 1),经验证,土地利用数据平均分类精度达到 80% 以上。土壤数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),气象、水文数据来源于嘉兴市水利局统计数据公报,社会经济数据统计数据来源于嘉兴市统计年鉴。

表 1 嘉兴市土地利用类型分类

Table 1 Classification of land use in Jiaxing City

一级类型 Primary classification	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	园地 Garden plots	水域 Water area	建设用地 Constructed area	其它用地 Other
二级类型 Secondary classification	水田 旱地	有林地 灌木林 疏林地	园地	河渠 湖泊 水库坑塘 沿海滩涂 内陆滩涂	城镇用地 农村居民点 交通用地 工业用地 其他建设用地	自然保留地 海域

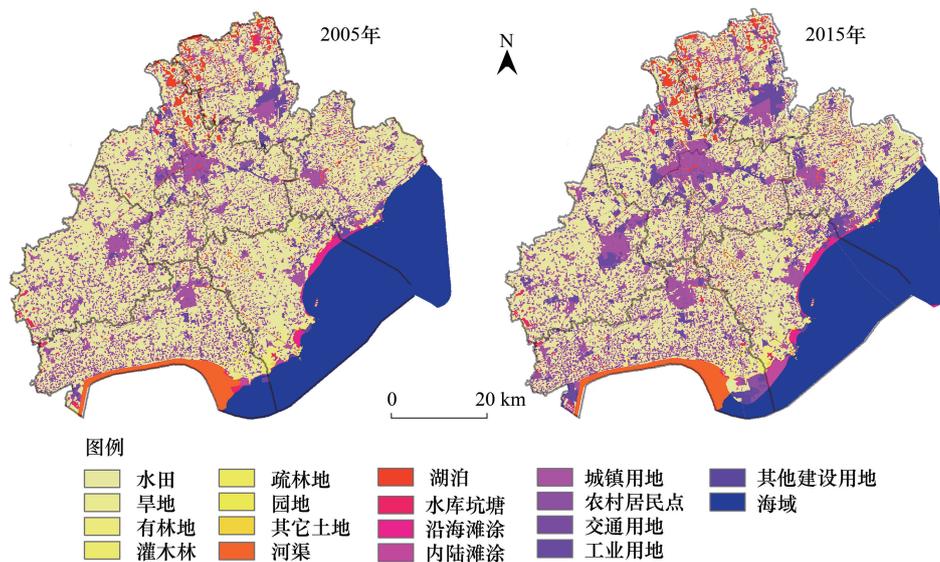


图 1 嘉兴市土地利用图(2005 年、2015 年)

Fig.1 Land use of Jiaxing city (2005 left, 2015 right)

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用与生态系统服务的关联框架

土地是各类生态系统的镶嵌体,是自然属性与人文要素综合作用而形成的地理实体,土地利用会导致生态系统服务的变化^[22]。生态系统服务与土地利用的关系主要体现在两方面(图 2):一方面,人类对生态系统服务需求的不同,造成生态系统服务类型的差别,有意或无意的改变着土地利用,出现不同土地利用类型^[23]。另一方面,不同的土地利用类型对生态系统结构和过程造成的不同影响,引起生态系统服务功能积极或消极的变化^[24],进而影响人类福祉。因此,影响生态系统服务供需水平的因素主要包括自然因素与社会经济因素两方面^[25]。自然因素包括气候、地形地貌、植被、土壤、水文、生物多样性等。社会经济因素的影响主要体现在人口变化、人类活动、经济发展结构等对土地利用类型造成的改变等。

2.2.2 生态系统服务供需关系矩阵构建

根据 Burkhard 提出的“生态系统服务供需关系矩阵法”,生态系统服务供需关系矩阵由供给矩阵与需求

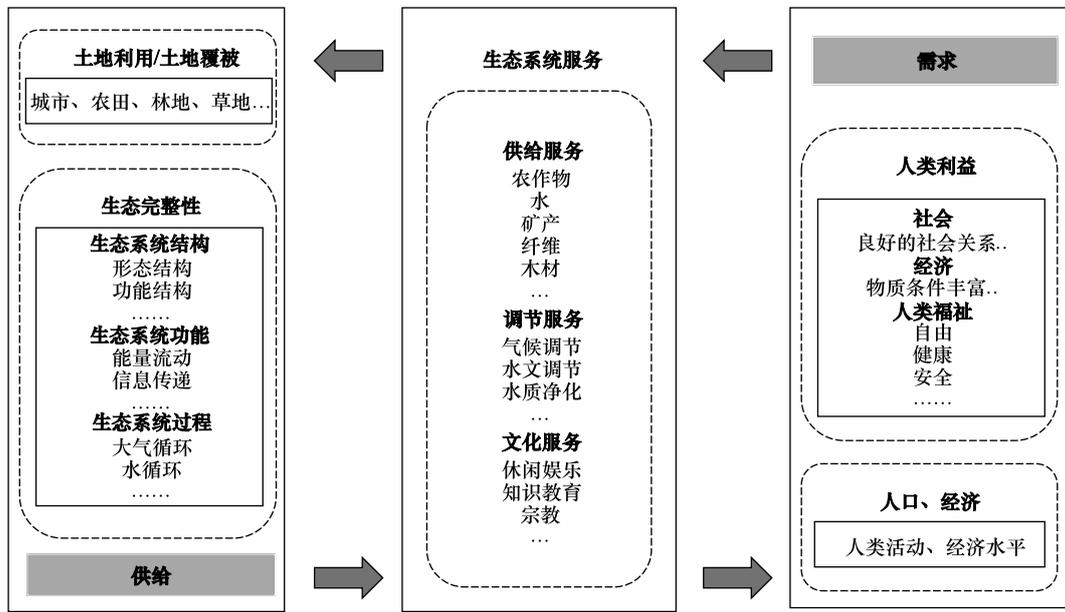


图2 土地利用与生态系统服务的关联框架

Fig.2 Linkage framework of land use and ecosystem services

矩阵综合而成,是不同土地利用类型与不同生态系统服务的供需关系表征,能够揭示自然条件与人类活动随时间的推移产生的变化以及土地利用的改变对生态系统服务能力的影响。

矩阵数据采用专家打分法获得,专家针对不同土地利用类型代表的生态系统能够提供的生态系统服务价值以及人类期望从该系统中获得的福祉分别进行评分,最终获得生态系统服务价值的总体概况及趋势^[26-27]。

本研究邀请了不同专业知识背景,包括生态学、景观生态学、风景园林学、地理学、植物学等且对评价区域的自然及社会环境非常了解的10位专家,针对嘉兴市各类用地(生态系统)在对人类福祉有直接贡献的调节服务、供给服务与文化服务进行供需水平的全面评分,分值在0—5之间,分值越大,供给能力/需求水平越高。经过两轮函询,取得一致意见,形成针对嘉兴市生态系统服务供给、需求、供需关系矩阵(表2—4)。

本文选取了水文调节服务矩阵形成嘉兴市生态系统服务供需关系“子”矩阵,结果表明,近自然土地利用类型(如林地、水体等)所提供的水文调节供给能力最高,这些地区由于人口密度低,活动影响较小,对水文调节服务的需求水平也越低。人类活动强度大的土地利用类型(如城市建设用地)水文调节服务供给能力弱,同时由于人口密集,对水文调节服务的需求水平很高。水田对水文调节服务的供给能力最强,但需求水平也最高,因为水田具有一定蓄水作用,能够调节径流,起到土壤水库的作用^[28];同时水田是水土相互作用的生产模式,对水资源具有较高的需求。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

经统计,2005—2015年嘉兴市土地利用结构的变化见表5。从面积变化来看,建设用地增长显著,至2015年已达1376.7 km²,占全市土地总面积的32.6%,比2005年增加了296.9 km²;其次是水域,2015年水域面积500.5 km²,面积增加了115.9 km²;水田面积一直占主导地位,2015年水田面积1842.5 km²,占全市土地总面积的43.6%,但是变化最小,面积仅增加了64.2 km²。面积减少最多的是园地,2015年园地面积211.9 km²,与2005年相比共减少135.8 km²,占全市土地总面积的比例下降到5.0%。

从变化幅度来看,增幅最多的是水域,其次是建设用地,10年间分别增加了30.1%和27.5%。林地面积最小,但是变化幅度最大,2015年林地面积26.7 km²,仅占全市土地总面积的0.6%,但是较2005年减少了56.1%。

表 2 嘉兴市生态系统服务供给矩阵
Table 2 Ecosystem service supply matrix of Jiaxing city

	调节服务	全球气候调节	本地气候调节	空气质量调节	水文调节	水质净化	营养调节	土壤侵蚀调节	自然灾害调节	授粉	浪费调节	供给服务	农作物供给	能源供给	生物产品供给	纤维供给	木材供给	生物产品供给	生物化学供给	淡水供给	矿产供给	非生物资源供给	文化服务	休闲娱乐	景观美学享受	知识与教育	宗教文化	文化遗产多样性	自然遗产多样性		
耕地	3	2	1	5	5	3	2	2	2	2	3	0	1	0	0	0	0	0	1	5	0	0	0	0	0	2	0	0	0		
Cultivated land	2	2	1	2	0	3	3	2	3	3	3	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0		
林地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Forest land	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
园地	1	2	1	2	3	3	1	3	3	2	2	0	1	0	1	0	1	0	1	2	0	0	2	1	2	0	2	0	0	0	
Garden plots	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
水域	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Water area	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
水库坑塘	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
沿海滩涂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
内陆滩涂	4	5	5	4	5	1	2	5	1	3	5	5	5	5	5	3	3	5	5	5	4	2	4	4	3	4	4	4	4	4	
城镇用地	3	5	5	4	2	1	4	2	1	4	2	4	4	4	4	3	3	4	5	5	3	3	4	4	3	3	2	3	2	3	
农村居民点	4	2	4	4	0	0	3	4	0	1	1	1	4	1	0	2	0	0	1	1	2	0	2	2	1	1	1	1	0	0	
交通用地	5	2	5	4	5	3	1	5	1	4	3	5	3	5	4	5	5	4	5	5	5	5	1	1	4	1	3	1	1	1	
工业用地	1	2	1	2	2	2	2	3	0	2	0	4	0	4	0	4	4	0	0	2	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
其他建设用地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
自然保留地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
海域	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Others																															

表 3 嘉兴市生态系统服务需求矩阵

Table 3 Ecosystem service demand matrix of Jiaxing city

	调节服务	全球气候调节	本地气候调节	空气质量调节	水文调节	水质净化	营养调节	土壤侵蚀调节	自然灾害调节	授粉	消费调节	提供服务	农作物供给	能源供给	生物产品供给	纤维供给	木材供给	生物产品供给	生物化学产品供给	淡水供给	矿产资源供给	非生物资源供给	文化服务	休闲娱乐	景观美学享受	知识与教育	宗教文化	文化遗产多样性	自然遗产多样性	
耕地	3	2	1	5	5	3	2	2	2	2	3	0	0	1	0	0	0	0	1	5	0	0	0	0	0	2	0	0	0	
Cultivated land	2	2	1	2	0	3	3	2	3	3	3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
林地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Forest land	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
灌木林	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
疏林地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
园地	1	2	1	2	3	3	1	3	3	2	2	0	0	1	0	1	0	1	2	2	0	0	2	1	2	0	2	0	0	
Garden plots	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
水域	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Water area	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
湖泊	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
水库坑塘	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
沿海滩涂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
内陆滩涂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
建设用地	4	5	5	4	5	1	2	5	1	3	3	5	5	5	5	3	3	5	5	5	4	2	4	4	3	4	4	4	4	4
城镇用地	3	5	5	4	2	1	4	2	1	2	2	4	4	4	4	3	3	4	5	5	3	3	4	4	3	3	2	3	3	3
农村居民点	4	2	4	4	0	0	3	4	0	1	1	1	4	1	0	2	0	0	0	1	2	0	2	2	1	1	1	1	0	0
交通用地	5	2	5	4	5	3	1	5	1	4	3	5	3	5	4	5	5	4	5	5	5	5	1	1	4	1	3	1	1	1
工业用地	1	2	1	2	2	2	2	3	0	2	0	4	0	4	0	4	4	0	0	2	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0
其他建设用地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
自然保留地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
其它	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Others	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
海域	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
海城	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4 嘉兴市生态系统服务供需矩阵
Table 4 Ecosystem service supply and demand matrix of Jiaxing city

	调节服务	全球气候调节	本地气候调节	空气质量调节	水文调节	水质净化	营养调节	土壤侵蚀调节	自然灾害调节	授粉	消费调节	服务供给	农作物供给	能源供给	生物产品供给	纤维供给	木材供给	生物产品供给	生物化学品供给	淡水供给	矿产供给	非生物资源供给	文化服务	休闲娱乐	景观美学享受	知识与教育	宗教文化	文化遗产及多样性	自然遗产及多样性
耕地		-3	0	0	-1	-5	0	-2	-2	-1	-1	4	4	0	0	0	0	0	-1	-5	0	0	1	1	1	-1	0	0	
Cultivated land		-1	1	0	0	0	0	-3	-1	0	-1	4	4	3	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	
林地		4	5	5	3	4	5	5	3	1	5	0	1	0	1	0	2	0	1	0	0	0	4	4	4	2	2	4	
Forest land		1	2	1	1	2	2	1	1	1	3	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	2	3	4	1	1	1	
灌木林		0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	1	1	
疏林地		1	0	1	0	-2	-1	1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	-1	-2	0	0	0	0	-1	0	1	1	
园地		0	1	0	3	3	3	0	3	0	5	0	2	0	0	3	0	3	0	3	0	2	4	4	3	1	2	2	
Garden plots		1	3	0	3	2	3	0	4	0	5	0	0	0	0	3	0	3	0	2	0	0	4	4	3	0	1	2	
水域		1	3	0	3	2	3	0	3	0	5	0	0	0	0	3	0	3	0	2	0	1	5	4	3	1	2	2	
Water area		1	1	0	1	1	1	1	5	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	3	0	1	1	
沿海滩涂		2	2	0	2	2	4	1	4	1	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	1	1	
内陆滩涂		-4	-5	-5	-4	-5	-1	0	-5	-1	-3	-5	-5	-5	-5	-3	-3	-3	-5	-5	-4	-2	-1	-2	-1	-2	-3	-4	
城镇用地		-3	-5	-5	-4	-4	-2	0	-4	-2	-2	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-4	-5	-3	-2	-2	-3	-1	-1	0	-3	
农村居民点		-4	-2	-4	0	0	0	-2	-4	0	-1	-1	-4	-1	-4	-1	-2	0	0	-1	-2	0	-2	-2	-1	-1	0	0	
Construted area		-5	-2	-5	-4	-5	-3	1	-5	-1	-4	-3	-5	-3	-5	-4	-5	-4	-5	-5	-5	-5	-1	-1	-4	-1	-1	-1	
工业用地		-1	-2	-1	-2	-2	-2	-1	-3	0	-2	0	-4	0	-4	0	-4	0	0	-2	-4	-1	0	0	0	0	0	0	
其他建设用地		2	2	0	1	3	4	5	1	2	2	0	1	2	0	0	0	0	1	0	0	0	3	4	4	1	2	2	
自然保留地		2	3	0	1	1	3	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	1	4	5	3	1	2	2	
海域																													

表 5 嘉兴市土地利用情况(2005 年、2015 年)

Table 5 Land use information of Jiaxing city(2005 and 2015)

地类 Land Use Classification	2005 年		2015 年		变化幅度 Change ranges	
	面积/km ² Area	比例/% Ratio	面积/km ² Area	比例/% Ratio	面积/km ² Area	比例/% Ratio
水田 Paddy field	1778.3	44.4	1842.5	43.6	64.2	3.6
旱地 Non-irrigated arable land	348.9	8.7	226.2	5.4	-122.7	-35.2
园地 Garden plots	347.7	8.7	211.9	5.0	-135.8	-39.1
林地 Forest land	60.8	1.5	26.7	0.6	-34.1	-56.1
建设用地 Constructed area	1079.8	26.9	1376.7	32.6	296.9	27.5
水域 Water area	384.6	9.6	500.5	11.9	115.9	30.1
其它土地 Others	8.7	0.2	38.4	0.9	29.7	341.4
总面积 Total	4008.8		4222.9		214.1	

其他土地指嘉兴市未利用地,包括裸土地、裸岩石砾地、沼泽地等,由于嘉兴市 2005 年与 2015 年市域面积统计口径不同,不能归入一级地类的都计入该类型,因变动较大,在此不做分析

3.2 水文调节服务供给能力的时空变化

应用生态系统服务供给矩阵分析方法,获得嘉兴市水文调节供给能力的空间分布图(图 3),图中可以看出水文调节服务供给能力具有明显的时空分异特征。以 2015 年为例,嘉兴市水文调节服务供给能力高(得分为 4)的区域分布范围最广,面积最大(1842.5 km²),以水田为主,占全市土地面积的 43.63%。供给能力较高(得分为 3)的地区主要分布在河渠与水库较为集中的区域,尤其是海宁市南部沿海地区以及海盐县澉浦镇。供给能力中等(得分为 2)的地区分布较广,其中在大量湖泊、湿地分布的王江泾镇、油车港镇、嘉善县东北部的陶庄镇、天凝镇以及由于围垦造成滩地大幅增加的海盐县澉浦镇分布最为集中。供给能力较低(得分为 1)的地区集中分布在嘉兴市的东南沿海滩涂地区。供给能力最低(得分为 0)的区域呈现点、线、面分布的特征。其中,城镇用地及工业用地面积较大,呈面状集中分布在嘉兴、桐乡、海宁、嘉善和海盐的中心城区及近郊地区;农村居民点则呈点状分散分布,面积较小;交用地呈线状辐射整个嘉兴市域。

从时间变化情况来看(表 6),2005 年-2015 年 10 年间,低供给能力的区域面积增加显著,2015 年达到 296.9 km²,增幅 27.5%。2015 年水文调节供给能力高以及较高的区域面积共 2291.2 km²,较 2005 年增加了 129.1 km²。水文调节供给能力提高市由于政策引导的影响,嘉兴市在《嘉兴市土地利用总体规划(2006—2020)》中,提出了“先补后占”“旱地改水田”等耕地和农田保护政策,以及土地围垦增加了滩涂面积,水文调节供给能力有了一定的提升。

从空间上看,水文调节供给能力最低的区域不断扩张,这是由 10 年间城市向城郊蔓延,侵占周围的旱地、园地等生态用地造成的。相应的,被侵蚀的中等供给能力区域不断萎缩,10 年间共减少 246.9 km²,减幅 33.3%。总体来说,由于供给能力中等的土地大量减少以及供给能力最低的土地大量增加,虽然水文调节供给能力高和较高的区域有所增加,但是嘉兴市水文调节服务供给能力仍然呈下降趋势,这与城市的快速发展密切相关。

表 6 嘉兴市水文调节服务供给能力统计结果(2005 年、2015 年)

Table 6 Statistics on the supply capacity of hydrological regulation services in Jiaxing City(2005 and 2015)

得分 Scores	需求程度 Demand extent	2005 年		2015 年		变化量/km ² Amount	变化幅度/% Ranges
		面积/km ² Area	比例/% Ratio	面积/km ² Area	比例/% Ratio		
4	高	1778.3	44.4	1842.5	43.6	64.2	3.61
3	较高	383.7	9.6	448.7	10.6	64.9	16.9
2	中等	741.8	18.5	494.9	11.7	-246.9	-33.3
1	较低	25.2	0.6	60.1	1.4	35	139.4
0	最低	1079.8	26.9	1376.7	32.6	296.9	27.5

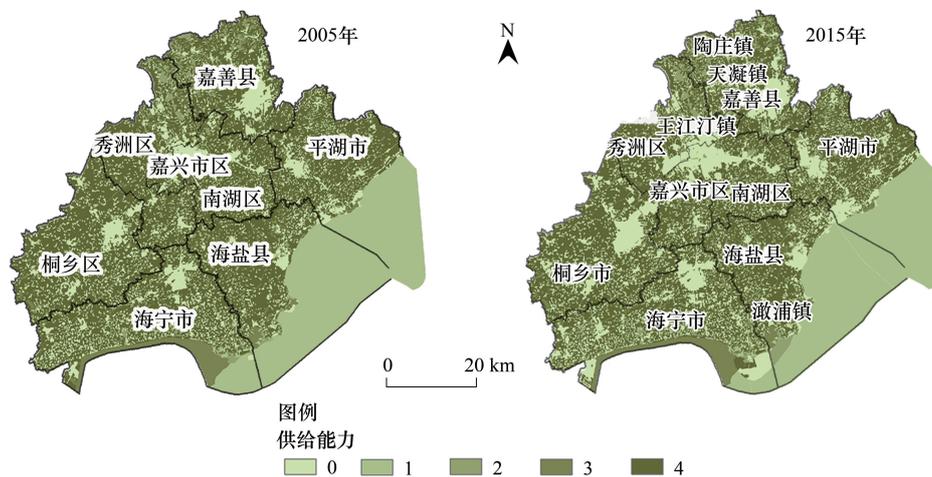


图3 嘉兴市水文调节服务供给能力空间分布(2005年、2015年)

Fig.3 Spatial distribution of hydrological regulation services supply capacity in Jiexing City (2005, 2015)

3.3 水文调节服务需求水平的时空变化

应用生态系统服务需求矩阵分析方法,获得嘉兴市水文调节需求水平的空间分布图(图4)。以2015年为例,需求水平最高(得分为5)的区域面积最大(2428.5 km²),以水田和农村居民点为主,占全市区域总面积的57.5%。需求水平高(得分为4)的地区在嘉兴市、桐乡市、海宁市、嘉善县和海盐县中心城区及城镇地区分布集中,占全市区域面积的18.4%。需求水平中等(得分为2)的地区面积较小,呈点状分布,其中在海盐县中心区与海宁市黄湾镇南部以旱地、园地为主的地区分布较为集中。需求水平最低(得分为0)的地区集中在嘉兴市北部王江泾镇、油车港镇、嘉善县东北部的陶庄镇和天凝镇的湖泊、湿地处,以及海宁市南部和海盐县东部的沿海滩涂及滩地地区。

从时间变化情况来看(表7),2005年—2015年10年间,嘉兴市对水文调节服务的需求显著提高,表现在对水文调节需求水平最高的区域及高需求区域面积的增加。2015年两类高需求区域面积共3205.3 km²,占全市区域面积的75.9%,较2005年增加了347.2 km²,增幅12.1%。与此同时中等需求水平的区域面积急剧减少,10年间共减少452 km²,减幅35.1%。这是因为嘉兴市不断地围湖造田、围荡养殖,城市开发建设蚕食生态用地,侵占河道水域,直接降低了河网的调蓄能力。需求水平最低的区域有所增加,较2005年增加24.6%,但是面积变化最小(增加111.5 km²),对水文调节服务需求水平的影响作用不明显。

从空间上看,2005—2015年10年间嘉兴市对水文调节服务的需求水平一直较高,并且高需求水平区域面积不断扩大。近郊区服务水平变化最为明显,表现在对水文调节服务需求水平越来越高。综合来看,嘉兴市对水文调节服务的需求水平整体较高,这是因为嘉兴市仍然处于工业化、城镇化、农业现代化快速推进时期,对水文调节、防洪排涝等水生态安全的需求较大。另外嘉兴市水田为主的土地利用特征也决定了对水文调节服务的较高需求。

表7 嘉兴市水文调节服务需求水平统计结果(2005年、2015年)

Table 7 Statistics on the demand level of hydrological regulation services in Jiexing City (2005 and 2015)

得分 Scores	需求程度 Demand extent	2005年		2015年		变化量/km ² Amount	变化幅度/% Ranges
		面积/km ² Area	比例/% Ratio	面积/km ² Area	比例/% Ratio		
5	最高	2221	55.4	2428.5	57.5	207.5	9.3
4	高	637.1	15.9	776.8	18.4	139.7	21.9
2	中等	696.6	17.4	452	10.7	-244.6	-35.1
0	最低	454.1	11.3	565.6	13.4	111.5	24.6

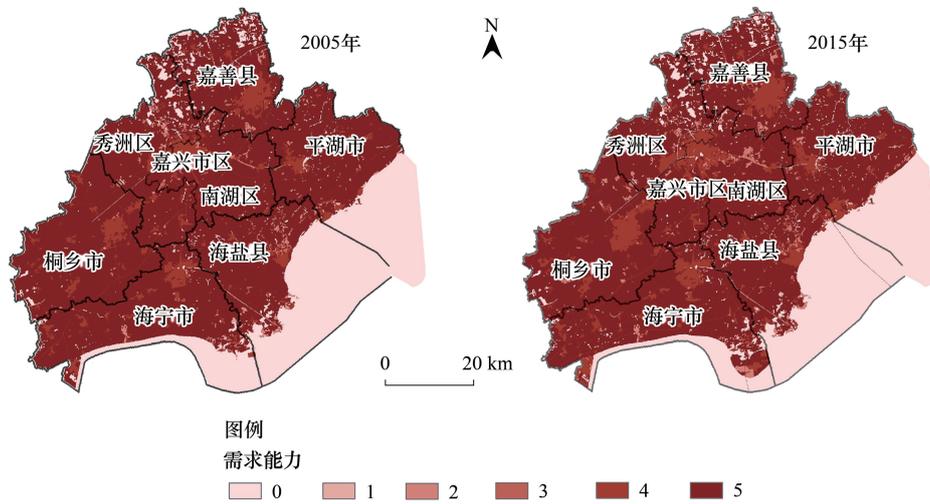


图 4 嘉兴市水文调节服务需求水平空间分布 (2005 年、2015 年)

Fig.4 Spatial distribution of hydrological regulation services demand level in Jiexing City (2005,2015)

3.4 水文调节服务供需关系时空分异性分析

依据水文调节服务供给与需求的综合能力值可以将嘉兴市水文调节服务供需关系分为 3 种状态和 4 种空间类型(图 5、表 8)。3 种状态指供需平衡、供不应求、供过于求的状态。4 种空间类型即低供给高需求、高供给高需求、低供给低需求、高供给低需求四类^[29](图 6)。

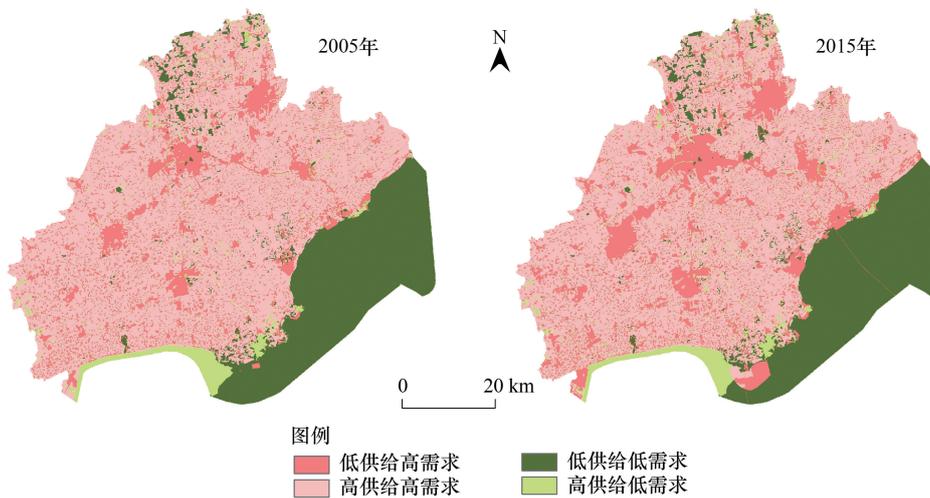


图 5 2005 年、2015 年嘉兴市水文调节服务供需关系类型空间分布图

Fig.5 Spatial distribution map of supply and demand relationship of hydrological regulation service of Jiexing City (2005,2015)

嘉兴市水文调节服务供不应求的区域一直占主导地位,并且面积持续扩大,增幅较快。2015 年供不应求与供过于求的区域总面积比例约为 5.7:1,面积增幅比例约为 3:1(表 9)。2015 年水文调节服务供不应求的区域面积 3219.2 km²,以建设用地和水田为主,占全市面积的 76.2%,较 2005 年增加了 19.7%。供过于求的土地面积 565.6 km²,占全市面积的 13.4%,增幅 11.2%。供需平衡的土地面积最小(438.1 km²),占全市面积的 10.4%,但是减幅最高,达到 59%。空间分布上来看,嘉兴市水文调节服务供过于求的区域分布在河流、湖泊以及水系密集的区域以及近自然植被覆盖的生态环境较好的区域。供不应求的区域以低供给高需求建设用地以及高供给高需求的水田为主,并以城市为核心向城郊扩散(图 7)。

总体来看,嘉兴市大部分地区在水文调节服务上处于供不应求的状态。这首先与嘉兴市以水田(高供给

高需求)为主的土地利用结构相关。其次,由于城镇扩张,低供给高需求的区域面积不断增加,说明水文调节服务供需关系与人类的活动和区域资源的过度开发密切相关。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 研究方法讨论

(1)生态系统服务供需关系矩阵法可以在数据难以获取时或生态系统服务较为复杂的情况下,对生态系统服务供给与需求及相互关系进行快速判断并能进行时间维度的动态对比演变研究。虽然有学者采用不同陆地生态系统单位面积生态服务价值表估算也实现了生态系统服务的动态变化^[30],但无法对需求进行度量并进行供需关系研究。本文对嘉兴市水文调节服务进行了动态评估,利用 GIS 空间分析技术,分析了水文调节服务的空间分异规律,可为嘉兴市生态系统可持续发

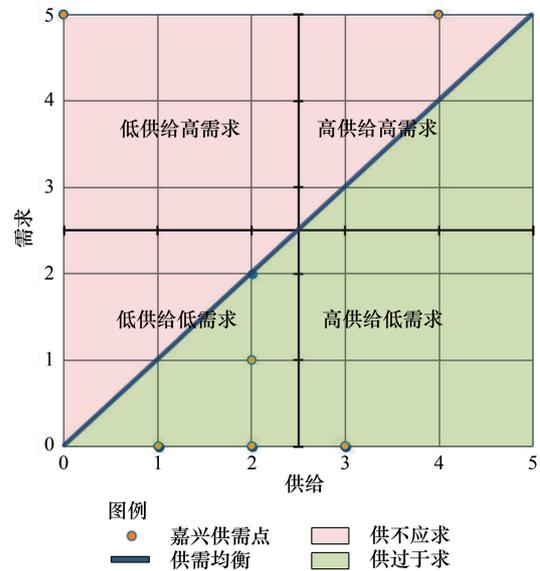


图 6 供给与需求服务关系的四种类型

Fig. 6 Four types of relationship between ecosystem service supply and demand

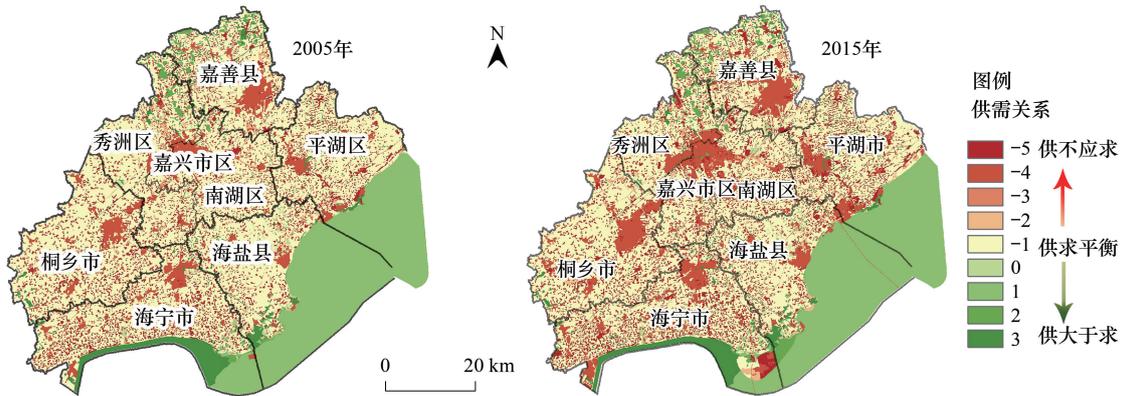


图 7 嘉兴市水文调节服务供需空间分布图(2005 年、2015 年)

Fig.7 Spatial Distribution map of supply and demand of hydrological regulation service of Jiaxing City (2005,2015)

展和管理,维护、恢复和改善生态系统服务提供依据。

表 8 嘉兴市水文调节服务供需关系类型

Table 8 Supply and demand relationship type of hydrological regulation service of Jiaxing City

供需类型 Types	平衡 Balance		失衡 Unbalance
	供需平衡 Supply = demand	供过于求 Supply > demand	供不应求 Supply < demand
低供给高需求 Low supply for high demand	—	—	建设用地(城镇、农村、交通、工业等)
高供给高需求 High supply for high demand	—	—	耕地(水田)
低供给低需求 Low supply for low demand	耕地(旱地)、园地	林地(灌木林、疏林地)、水域(湖泊、滩涂、滩地)	—
高供给低需求 High supply for low demand	—	林地(有林地)、水域(河渠、水库坑塘)	—

表9 2005年、2015年嘉兴市水文调节服务供求状况表

Table 9 Supply and demand relationship of hydrological regulation service of Jiaying City in 2005 and 2015

供需状态 State	2005年		2015年		变化量 Changes		
	面积/km ² Area	比例/% Ratio	面积/km ² Area	比例/% Ratio	面积/km ² Area	变化幅度/% Ranges	年变化速率/% Annual change rate
供过于求 Oversupply	454.1	11.3	565.6	13.4	111.5	11.2	1.12
供不应求 Supply shortage	2858.1	71.3	3219.2	76.2	361.1	19.7	1.97
供需平衡 Balance between supply and demand	696.6	17.4	438.1	10.4	-258.5	-59	5.9

(2)生态系统服务供需关系矩阵具有不确定性。该方法忽略了同一生态系统类型内部差异与区域空间差异容易对区域评估结果产生偏差,所以具有一定的地域局限性。同时,生态系统服务供需关系矩阵法在供需评估中也存在不确定性,主要有自然供给能力判断的不确定性;偏好不确定性;技术不确定性等^[31]。自然供给能力的不确定性来源于人们对生态系统的认识不足引发不确定性。偏好不确定性与受访者的主观决策及对待评估的生态系统服务的认知水平和经验水平的差异有关,分值结果高度依赖于打分者的经验和知识。技术不确定性指应用不同的方法来评估生态系统服务的过程中产生的不确定性结果,如遥感影像的精度影响土地利用类型识别的准确性等。评估方法的不确定性无法避免,但是可以通过诸如使用德尔菲法对专家评估进行迭代;将不确定性信息纳入评估过程和结果;优化数据质量等降低分析结果的不确定性。

4.1.2 基于供需关系的管理对策

生态系统服务供需关系矩阵法可帮助识别供需平衡、供不应求、供过于求三种状态及低供给高需求、高供给高需求、低供给低需求、高供给低需求四类区域,为制定相应的发展引导策略和规划建议提供依据(表10)。

表10 基于水文调节服务提升的嘉兴市发展引导及规划建议

Table 10 Development strategies and planning recommendations based on improvement of hydrological regulation service of Jiaying City

服务状态 State	面积/km ² Area	占比/% Ratio	发展引导策略与规划建议 Development strategies and planning recommendations
低供给高需求 Low supply for high demand	1376.7	32.6	划定城镇开发边界,严格控制建设用地规模,集约利用土地;控制新增建设用地不透水面积,推行低影响开发策略;加强生态保护和修复,提高绿地率、绿化覆盖率,构建绿色网络
高供给高需求 High supply for high demand	1842.5	43.6	划定永久基本农田控制线与永久基本农田示范区,确定保护规模;复垦优质耕地,纳入基本农田整备区,予以严格保护
低供给低需求 Low supply for low demand	890.5	21.1	按照相关保护条例进行保护和管控,统筹城乡发展,强化生态环境保护,保持嘉兴市“城田相融”的田园特征;以防洪与水环境保护为目标导向,结合水系现状和城市发展趋势完善现有水系布局,保障水面率,提高区域水源涵养及水土保持功能
高供给低需求 High supply for low demand	113.2	2.7	划定严格的生态保护红线,出台生态控制导则,严守生态底线;加强污染治理,维持良好的生态风貌

在本研究中,以城市建设用地为主的低供给高需求区域应在快速城镇化发展的同时兼顾生态环境效益提升。通过划定城镇开发边界,严格控制建设用地规模,集约利用土地;控制新增建设用地不透水面积,合理规划场地用地及景观雨水设施,推行低影响开发策略;加强生态保护和修复,通过提高绿地率、绿化覆盖率、构建区域绿色网络等方法提升水文调节服务。

以水田为主的高供给高需求区域占主导是嘉兴市的土地利用特色,可通过划定永久基本农田控制线与永久基本农田保护示范区,确定保护规模,避免农田被建设占用,实行永久保护;复垦优质耕地,纳入基本农田整备区,予以严格保护。

高供给低需求区域自然资源较好,是重要的生态源,但是往往生态敏感性较强,一旦受到破坏很难修复,需要实施严格的生态控制。应划定严格的生态保护红线,出台生态控制导则,严守生态底线,做到性质不转换、功能不降低、面积不减少、责任不改变;同时还要加强污染治理,维持良好的生态风貌。

属于低供给低需求区域的旱地、园地、林地应该按照相关保护条例进行保护和管控,统筹城乡发展,强化生态环境保护,保持嘉兴市“城田相融”的田园特征。以防洪与水环境保护为目标导向,结合水系现状和城市发展趋势完善现有水系布局,保障水面率,提高区域水源涵养及水土保持功能。

4.2 结论

(1) 2005—2015年10年间,嘉兴市处于快速城市化阶段,土地利用变化明显。总体趋势是建设用地显著增加,水域、水田面积有所增加,旱地、园地、林地大量减少。

(2) 土地利用变化是影响水文调节服务供需关系的主要因素。2015年嘉兴市水文调节服务供不应求的区域占研究区域的76.2%,较2005年增加了19.7%;供过于求的区域占全市土地面积的13.4%,增加111.5 km²;供需平衡的土地面积减少258.5 km²,减幅达59%。反应出嘉兴市大部分地区水文调节服务处于供不应求的状态。

(3) 建设用地是典型的低供给高需求区域,随着城市用地的不断扩张,导致水文调节服务供需矛盾加剧,供不应求区域由中心城区向城市边缘区扩大。

(4) 水文调节服务需求区域的变化与人类活动密切相关,供给区域则受制于自然环境的数量与质量。生态系统服务供给与需求存在错位,促进了由供给区向需求区的生态系统服务流的产生^[32]。如何保护生态源,对受损和破坏的生态系统服务流进行恢复及重建,需要针对体情况进行政策导引。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Termansen M, McClean C J, Jensen F S. Modelling and mapping spatial heterogeneity in forest recreation services. *Ecological Economics*, 2013, 92: 48-57.
- [4] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, Van Bodegom P M, Bouten W, Verburg P H, Davidson M D. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24-33.
- [5] Vrebos D, Staes J, Vandenbroucke T, Haeyer T D, Johnston R, Muhumuza M, Kasabeke C, Meire P. Mapping ecosystem service flows with land cover scoring maps for data-scarce regions. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 28-40.
- [6] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, Villa F. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125.
- [7] Crossman N D, Burkhard B, Nedkov S, Willemen L, Petz K, Palomo I, Drakou E G, Martín-Lopez B, McPhearson T, Boyanova K, Alkemade R, Egoh B, Dunbar M B, Maes J. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 4-14.
- [8] Martínez-Harms M J, Balvanera P. Methods for mapping ecosystem service supply: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2012, 8(1/2): 17-25.
- [9] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [10] 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. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [11] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [12] Burkhard B, Kroll F, Müller F, Windhorst W. Landscapes' Capacities to Provide Ecosystem Services—a Concept for Land-Cover Based Assessments. *Landscape Online*, 2010, 15: 1-22.
- [13] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological*

- Indicators, 2012, 21: 67-79.
- [14] 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.
- [15] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Juha M A. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法. *生态学报*, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [16] 顾康康, 杨倩倩, 程帆, 储金龙, 陈晓华. 基于生态系统服务供需关系的安徽省空间分异研究. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(7): 577-583.
- [17] 黄智洵, 王飞飞, 曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例. *生态学报*, 2018, 38(12): 4327-4340.
- [18] 江波, 蔡金洲, 杨梦斐, 王晓媛. 基于供需耦合机制的流域水生态系统管理. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 3155-3162.
- [19] 景永才, 陈利顶, 孙然好. 基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架. *生态学报*, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [20] 邓晓军, 许有鹏, 韩龙飞, 李广, 王跃峰, 项捷, 徐光来. 城市化背景下嘉兴市河流水系的时空变化. *地理学报*, 2016, 71(1): 75-85.
- [21] 拜存有, 高建峰. 城市水文学. 郑州: 黄河水利出版社, 2009.
- [22] 杜习乐, 吕昌河, 王海荣. 土地利用/覆被变化(LUCC)的环境效应研究进展. *土壤*, 2011, 43(3): 350-360.
- [23] 颜文涛, 黄欣, 邹锦. 融合生态系统服务的城乡土地利用规划: 概念框架与实施途径. *风景园林*, 2017, (1): 45-51.
- [24] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta-Michlik L, Leemans R, Schröter D. The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114(1): 69-85.
- [25] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 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.
- [26] Burkhard B, Crossman N, Nedkov S, Petz K, Alkemade R. Mapping and modelling ecosystem services for science, policy and practice. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 1-3.
- [27] Scolozzi R, Morri E, Santolini R. Delphi-based change assessment in ecosystem service values to support strategic spatial planning in Italian landscapes. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 134-144.
- [28] 刘明, 王克林. 洞庭湖流域中上游地区景观格局变化的水文响应. *生态学报*, 2008, 28(12): 5970-5979.
- [29] 方家, 刘颂, 王德, 张月朋. 基于手机信令数据的上海城市公园供需服务分析. *风景园林*, 2017, (11): 35-40.
- [30] 李哲, 张飞, Kung H T, 张月, 井云清. 1998—2014年艾比湖湿地自然保护区生态系统服务价值及其时空变异. *生态学报*, 2017, 37(15): 4984-4997.
- [31] Hou Y, Burkhard B, Müller F. Uncertainties in landscape analysis and ecosystem service assessment. *Journal of Environmental Management*, 2013, 127(S1): S117-S131.
- [32] 姚婧, 何兴元, 陈玮. 生态系统服务流研究方法最新进展. *应用生态学报*, 2018, 29(01): 335-342.