

# 城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析

李广东<sup>1,2</sup>, 方创琳<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 土地利用多功能性识别是城市用地组织、协调与配置的基础信息源,是判定城市用地内在功能形态、功能组合模式和功能之间动态权衡的关键,具有重要的理论和实践意义,但长期以来并未构建一套可行的识别方法体系。本文从土地功能、生态系统服务和景观功能综合的视角构建城市生态—生产—生活空间功能分类体系,并以生态系统服务价值评估为基础系统整合空间功能价值量核算函数群,通过纵横对比的方法确定空间功能主导类型。研究区实证分析表明,城市生态—生产—生活功能分类体系较好反映了不同地类的功能类型;空间主导功能的识别也与不同地类的功能匹配;同时也发现三生空间的整体毗邻性较低、空间功能的互补和融合性较差的问题;三生空间功能存在一定的空间集聚性。

**关键词:** 三生空间;城市;土地功能;生态系统功能;景观功能;功能识别;价值评估

DOI: 10.11821/dlxb201601004

## 1 引言

土地利用是城市地域空间的实体表现形态和核心主体。土地利用变化被认为是全球生态系统变化、生物化学过程变化、气候变化和人类脆弱性变化的主要驱动因素之一<sup>[1]</sup>,同时也是人地系统交互耦合的承载核心。城市是人类社会与自然环境相互作用最为剧烈的地区。这种交互作用的突出特点之一是赋予了城市用地的多重功能属性。从广义的层面来看,土地资源不仅是重要的生产要素,提供人类生存不可或缺的食物、淡水以及木材、纤维、能源等生产原料、动力等,也是人类活动的关键性资源,提供诸如居住、交通、存储、休闲娱乐等生活功能,其同时还具备土壤、水文、气候、植被、地形等生态环境特征<sup>[1]</sup>。这种多功能性是城市用地组织、协调与配置的基础,是判定城市用地内在功能形态、功能组合模式和功能之间动态权衡的关键。因此,明晰城市土地利用的多功能性对决策制定、城市和区域空间规划实践以及“城市发展边界、生态安全红线和耕地保护红线”三线划定都具有重要的指导意义。

土地功能的概念由来已久,但最近几年相关研究才逐步涌现。要明晰土地功能的基本概念,需要对土地利用、生态系统功能和景观功能有一个明确的认识。从功能性来看,土地利用更倾向为社会经济目的导向下的土地利用。而从连续性来看,联合国粮农组织(FAO)将土地利用定义为更像是“人们对特定土地利用覆被类型的安排、活动和投入去获取生产、转化和维持这些能力”。土地利用多功能研究最早发端于农业多功能性

收稿日期: 2015-04-16; 修订日期: 2015-08-25

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAJ22B03) [Foundation: The National Science and Technology Support Planning, No.2012BAJ22B03]

作者简介: 李广东(1986-), 男, 山东临沂人, 博士, 助理研究员, 中国地理学会会员(S110008922M), 主要从事城市发展与土地利用变化研究。E-mail: ligd@igsnrr.ac.cn

研究, 源于 20 世纪末的欧盟<sup>[2]</sup>。农业多功能性与农业政策一直是国外学者研究的重点<sup>[3]</sup>。近几年基于指标量化体系的农业多功能性定量表达逐步被学者认可<sup>[4-7]</sup>。农业多功能分析框架也逐步涌现, 农业功能分类体系、农业综合功能及多功能性评价、农业多功能性定量表征及其空间化、农业多功能相互作用机理解析、农业多功能性动态演变及趋势预测和农业多功能性多层次关联成为研究热点<sup>[8]</sup>。在单一的农业多功能性分析基础上, 土地利用多功能性分析也逐步受到关注。可持续的土地利用多功能性理念<sup>[9]</sup>一直是土地多功能利用的基本前提。由于直接定量刻画的难度, 土地利用多功能分析往往通过指标分析方法进行定量测算和表达。因此, 土地利用多功能分析指标体系框架构建一直是学者研究的基础和热点问题<sup>[10-11]</sup>。对此国内学者也进行了有益尝试<sup>[12-15]</sup>。但是, 土地功能的概念至今尚缺乏一个广泛认可的定义。为了明晰土地功能, 此处将其定义为“土地利用系统和特定景观尺度的生态系统提供的资产和服务”。土地功能包括生态、生产和生活三种功能类型, 涵盖生物物理过程、直接和间接生产以及精神、文化、休闲、美学的需求满足等, 是自然系统和社会经济系统协同耦合的产物。

生态系统功能在生态学框架下逐步演化而来, 被认为是人类从生态系统中获取的福利<sup>[16]</sup>, 核心目标是链接生态系统变化和人类福利。生态系统功能价值评估工作是开展最早、影响力最大的功能价值评估系统。其也是景观功能、土地功能分类和评估的基础。20 世纪 90 年代末以全球自然资本评估<sup>[17]</sup>为代表的一系列研究加速了全球范围内生态系统服务价值研究的热潮。尤其是 2001-2005 年开展的 Millennium Ecosystem Assessment (MA) 计划更是将这一浪潮推到顶点。价值转换方法是生态系统评估最为常用的方法。基于定量化模型的测算方法 (InVEST、SoIVES、Ecosystem Service-based State and Transition Models 等) 和借助 GIS 的生态系统服务价值空间制图与定量化表达<sup>[18-21]</sup>日益成为生态系统服务价值评估的热点。景观功能概念起源于景观生态学和空间规划, 被视为是景观对人类社会的需求满足。景观是生态系统和土地利用交互作用的产物。从可持续发展的角度, 景观功能被细分为生产 (经济)、生活 (社会) 和调节 (生态) 功能。要精确地区分开景观功能和生态系统功能是极为困难的。因此, 部分学者认为生态系统功能与景观功能属同义。但从诸多景观功能分类研究来看, 承载功能 (空间支持功能) 是景观功能区别与生态系统功能的主要体现。de Groot 认为以调节功能、栖息地功能、生产功能、信息功能和承载功能为主导的景观功能分类框架是景观功能分析工具应对景观规划中土地利用冲突问题的可行方法<sup>[22]</sup>。景观多功能性的定量识别与制图表达、多功能景观空间识别、多功能景观规划与管理、多功能景观权衡机理解析、多功能景观尺度和划区效应评估、多功能景观动态监测和情景模拟也是近年来研究的一大热点<sup>[23-27]</sup>。

中共十八大报告中明确指出国土生态—生产—生活空间的发展目标——“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”<sup>①</sup>。这一空间划分方法与国内外广泛认可的可持续发展的生态—生产—生活“三支柱”理念不谋而合。因此, 城市的可持续发展是以三生空间为本底的可持续发展, 三生空间的发展目标对城市层面的实体空间布局、功能组合都具有重要的指导意义。同时, 基于土地利用多功能框架下的三生空间研究仍处于初级阶段。三生空间的具体内涵、定量识别与测度、交互关系、功能组合形式、优化路径等都亟待厘清。基于此, 本文主要从理论和实践两个层面借助生态系统服务、景观功能和土地功能分析方法构建城市三生空间功能体系、定量测度三生空间功能价值量, 结合实证案例对三生空间的主导功能进行定量识别, 并分析空间功能毗邻关系以及集聚性。

① 资料来源: [http://www.gov.cn/jdhd/2012-11/17/content\\_2268826.htm](http://www.gov.cn/jdhd/2012-11/17/content_2268826.htm)。

## 2 城市生态—生产—生活空间功能分类体系

### 2.1 城市生态—生产—生活空间功能分类依据

生态系统服务价值评估虽然有50年左右的历史,但系统而综合的生态系统服务分类体系一直较欠缺<sup>[28]</sup>。而生态系统功能分类体系是生态系统服务价值评估的前提,因此也吸引了一些学者和生态系统研究项目的关注。de Groot长期致力于此项研究,并不断完善其分类体系<sup>[28-29]</sup>,其系统提出了将生态系统功能分为调节功能、栖息地功能、生产功能和信息功能4大类功能共计23项具体功能的分类体系。2007年开始的TEEB(The Economics of Ecosystems and Biodiversity)计划在很大程度上吸收了de Groot的研究成果,将生态系统功能分为提供功能、调节功能、栖息地功能和文化功能4大类22个具体功能。而前面所述的MA计划将生态系统功能分为支持功能、供给功能、调节功能和文化功能4大类,目前颇具影响力。Costanza等在其Nature论文中提出的17种生态系统功能是对生态系统功能的较为全面的总结<sup>[17]</sup>,也为多数学者所接受。但随着社会经济的不断发展,一些之前并不显著的服务功能不断被发现,各类体系也需要不断修正和更新。

景观功能分类与生态系统功能分类有较大相似之处。de Groot将景观功能分为调节功能、栖息地功能、生产功能、信息功能和承载功能5大类<sup>[22]</sup>。Lovell等基于景观多功能性的视角将景观功能分为生产、生态和文化3大类15个具体景观功能<sup>[24]</sup>。Willemen等基于规划需要通过代理指标将景观分为居住、集约养殖、文化遗产、饮用水、旅游、植被栖息、耕地生产和休闲骑行8项基本功能<sup>[30]</sup>。这些分类为城市三生空间功能分类体系构建提供了参考。

土地利用是自然和半自然系统的综合,土地功能应该是一个更为综合的功能体系。但至今仍缺乏一个完善的土地功能分类。大部分的分类体系仍无法实现真正的综合。虽然不少学者从生产、生活、生态的视角借助指标体系的方法对土地功能进行了尝试性的分类<sup>[5,10]</sup>,但毕竟代理指标只是替代变量无法测度相关功能较为精准的水平。基于此,本文试图系统整合生态系统功能体系和景观功能体系,提出一个较为完善和综合的以土地多功能性为基础的城市生态—生产—生活空间功能体系(表1)。

### 2.2 生态功能

生态功能是指生态系统与生态过程所形成的、维持人类生存的自然条件及其效用,包括气体调节、气候调节、水调节、水和废物净化、缓和突发事件、授粉、土壤保持、养分循环、初级生产9类具体功能。生态功能的9类二级功能大都来源于生态系统功能体系,同时也是生态系统功能研究中广泛认可的基本功能。土壤、水文、植被、气候和生物要素是构成土地利用生态功能的基本组件,通过这些要素的综合作用产生具体的功能类型。生物物理过程,尤其是其中的物质和能量流动过程是生态功能量的直接表征,也是土地利用生态功能识别的对象。

### 2.3 生产功能

生产功能是指土地作为劳作对象直接获取或以土地为载体进行社会生产而产出各种产品和服务的功能,它被进一步细分为生产与健康物质供给生产、原材料生产功能、能源矿产生产功能及间接生产功能4大类。生存与健康物质供给功能是维持人类生存和发展的基础性功能。人们熟知食物和水是土地利用系统最为重要的两大功能性供给物品。而药物和基因资源供给却往往被人们所忽视。药物资源是维持人类健康的必要保证。而基因资源是扩展人类食物供给的重要途径。两者在人类生存和健康上都具有重要意义。

表1 城市生态—生产—生活空间功能分类体系

Tab. 1 Functional classification system of urban ecological-production-living spaces

功能形式	一级功能	二级功能	解释	三级潜在表征指标
生态功能	调节功能	E1 气体调节	大气化学成份调节	单位面积大气污染物净化能力
		E2 气候调节	碳汇、温度、降水及其它由生物媒介的全球及地区性的气候调节	单位面积碳汇量/碳储量
		E3 水调节	地表水体径流调节与涵养	渗透量/渗透比率(径流量/表面积); 土壤水蓄储能力(mm/m); 泛滥平原水蓄储能力(mm/m)
		E4 水和废物净化	水源净化沉积物、农药、病原细菌和病原体, 过滤和分解水中和土壤中的有机物质	输沙量(g/l); 固体溶解总量(mg/l), 分解总量和种类(n/hm <sup>2</sup> ); 分解率(kg/hm <sup>2</sup> ·a)
		E5 缓和突发事件	洪水、火灾、飓风、地震和疾病控制等	洪峰强度、地震强度、飓风强度及损失量、控制的疾病等
		E6 授粉	生态系统变化影响到授粉的分布、丰度和效率	植物种类、分布以及传粉者的可获得性
		E7 土壤保持	土壤保持, 土壤侵蚀和滑坡控制能力	植被覆盖率(%); 水侵和风侵土壤流失量(kg/hm <sup>2</sup> ·a); 通用土壤流失方程评估滑坡频率系数(n/hm <sup>2</sup> ·a)
		E8 养分循环	养分循环能力(氮、磷等)	水质指标: 氮(mg/l)、磷(mg/l); 营养流失量(kg/hm <sup>2</sup> ·a); 导电系数( $\mu$ S/cm); 固体溶解量(mg/l); 营养流通率, 氮、磷(y <sup>-1</sup> )等
		E9 初级生产	植物初级生产能力	NPP(净初级生产力)
生产功能	生存与健康物质供给功能	P1 食物供给	持续生产或收获粮食、水果、野生浆果、蘑菇、坚果、牲畜、半家养动物、猎物、鱼和其它水生资源等	持续(有机的)获取粮食产品(t、hm <sup>2</sup> ); 持续(有机的)获取牲畜(t、hm <sup>2</sup> ); 持续获取鱼类产品(t、hm <sup>2</sup> ); 野生动物可作为食物的种类; 持续获取野生动植物产品(t、hm <sup>2</sup> )
		P2 淡水供给	淡水提供	整体的淡水资源量(百万 m <sup>3</sup> )
		P3 药物供给	持续生产和获得自然药物产品、生物化学或药物产品成分	由自然药物衍生的药品种类; 运用自然化合物的药物种类
		P4 基因资源	当地和地方性的品种保护, 品种基因库的维持	辛普森(Simpson)指数; 香农-威纳(Shannon-wiener)指数; 粮食种类; 牲畜品种; 鱼类品种
	原材料生产功能	P5 木材供给	木材产出	自然供给和持续产出的工业圆材量(百万 m <sup>3</sup> ); 由自然森林获取的纸浆和纸产品量;
		P6 纤维供给	纤维制品材料提供	持续的(有机的)棉花产品供给量(t、hm <sup>2</sup> );
		P7 装饰资源	持续生产和获得装饰和观赏用的野生植物、木制品和贝壳等	用于工艺品制作的自然材料种类; 持续获取观赏用园艺植物的总量
	能源矿产生产功能	P8 能源生产	石油、天然气、生物质能等	生物质能(百万 t 油当量); 石油和天然气产量(百万 t 油当量)
		P9 矿产生产	矿物产出	矿产、黄金等
	间接生产功能	P10 商品与服务产品生产	第二、三产业生产	批发零售用地、住宿餐饮用地、商务金融用地、其它商服用地、工业用地以及商用仓储用地等
生活功能	空间承载与避难功能	L1 居住承载	住房与附属设施用地	住宅用地价格(基准价格)
		L2 交通承载	水陆空交通线路及设施用地	替代价格(基准地价)
		L3 公共服务承载	公共服务设施用地、避难空间等	替代价格(基准地价)
	物质生活保障功能	L4 基本生活保障	维持基本生活保障	征地补偿标准、最低生活保障标准
		L5 就业保障	提供就业机会	直接提供和保障的就业人数
	精神生活保障功能	L6 科学和教育	为科学研究和教育提供对象	科研数量; 教育课程数量、人数
		L7 休闲	提供休闲旅游空间	最大可持续承载的旅游人数、营业收入
		L8 文化和艺术	提供艺术欣赏对象和设计灵感	以空间作为灵感或基础产出的书籍、印刷品数量
		L9 美学	提供美学基础、景观美学质量等	美学价值, 例如靠近自然保护区的户数
		L10 精神和历史	景观、宗教、文化、图腾、历史文物等	精神或宗教吸引的人数



原材料生产功能为二次生产提供基本原料。能源和矿产生产功能是维持现代工业文明社会的核心。由于大部分的能源和矿产资源不可再生,多数学者将其并未包含在传统的生态系统功能中。但是,从土地利用系统的视角来看,在一定时间范围内能源和矿产用地的属性是大体不变的。而且忽视能源矿产资源生产功能的土地利用系统是不全面的。土地系统提供的间接生产功能其实并不是真正的生产,其本质功能来源于其对地上附着物的承载,只是由于其承载的地上活动是间接生产而将其归于生产功能。这样划分也是为了将其与生活功能区别开来。

## 2.4 生活功能

生活功能是指土地在人类生存和发展过程中所提供的各种空间承载、物质和精神保障功能。具体细分为空间承载与避难功能、物质生活保障功能和精神生活保障功能。居住承载、交通承载、存储承载和公共服务承载功能是维持城市和区域系统运行的基底。同时,由土地系统提供的基本物质生活保障功能是维持人的基本生活需要的最后一道防线。农业人口占较大比例的中国更是如此。例如,耕地系统给予人的不仅仅是传统的生产功能,还有生活和工作的基本保障。在提供基本物质生活保障的同时,精神生活保障功能也是土地功能体系的核心内容。大自然为科学研究和教育活动提供了天然的研究对象。自然和人文景观更是人类追求休闲、文化和艺术、美学以及精神和历史的源泉。

# 3 数据与方法

## 3.1 研究区概况与数据来源

塘栖镇隶属于杭州市余杭区,距市中心约20 km。依托强劲的经济发展势头,塘栖镇成为浙江省首批小城市培育试点镇(图1)。塘栖镇地处杭州市城市边缘区是城市用地扩展较为迅速的区域。著名的京杭大运河穿镇而过,使其成为苏、沪、嘉、湖的水路要津。镇区内河道纵横、水网密布,是个典型的江南水乡。2010年,全镇共辖27个村、7个社区、503个村民小组,镇区总面积为79 km<sup>2</sup>,年末户籍人口94058人,其中非农人口46775人。2010年实现生产总值(GDP)41.69亿元,增长13.5%,全年完成工业总产值为155.69亿元,农业总产值6.23亿元,第三产业增加值10.43亿元。第二次土地利用调查结果显示,全镇农用地面积为4923.08 hm<sup>2</sup>,占镇域总面积的61.90%;建设用地面积为1978.67 hm<sup>2</sup>,占24.88%;未利用地面积为1051.11 hm<sup>2</sup>,占13.22%。

土地利用数据来源于塘栖镇第二次土地利用调查数据库。统计数据主要来源于《浙江省统计年鉴》(2010年)、《杭州市统计年鉴》(2010年)和《余杭区统计年鉴》(2010年)。生态系统监测数据来源于国家生态系统观测研究网络数据共享网(<http://cerndis1.cern.ac.cn/index.html>)。基准地价数据来源于杭州市国土资源局,包括基准地价表和地价图。另外,TEEB数据集来源于de Groot等的研究数据集<sup>[31]</sup>。

## 3.2 生态—生产—生活空间功能定量测度方法

三生空间功能定量测度的核心理念是通过整合多学科知识从人文和自然系统耦合的视角对土地功能进行统一标准的价值化表达。单从价值化方法来看,直接的生物物理过程测算和价值转化方法是最为常用的方法。但两者各有优劣势。生物物理过程测算相对更为准确但对数据的依赖性较强,而价值转化方法的适用性强但精度和空间异质性较差。因此,此处的首选方法是生物物理过程计算方法,以价值转换方法作为辅助对比。作为城市三生空间功能识别的基础,基于TEEB的1100余个全球范围内的功能案例对中国第二次土地利用调查的具体地类(12个一级类57个二级类,实践中由于农村土地

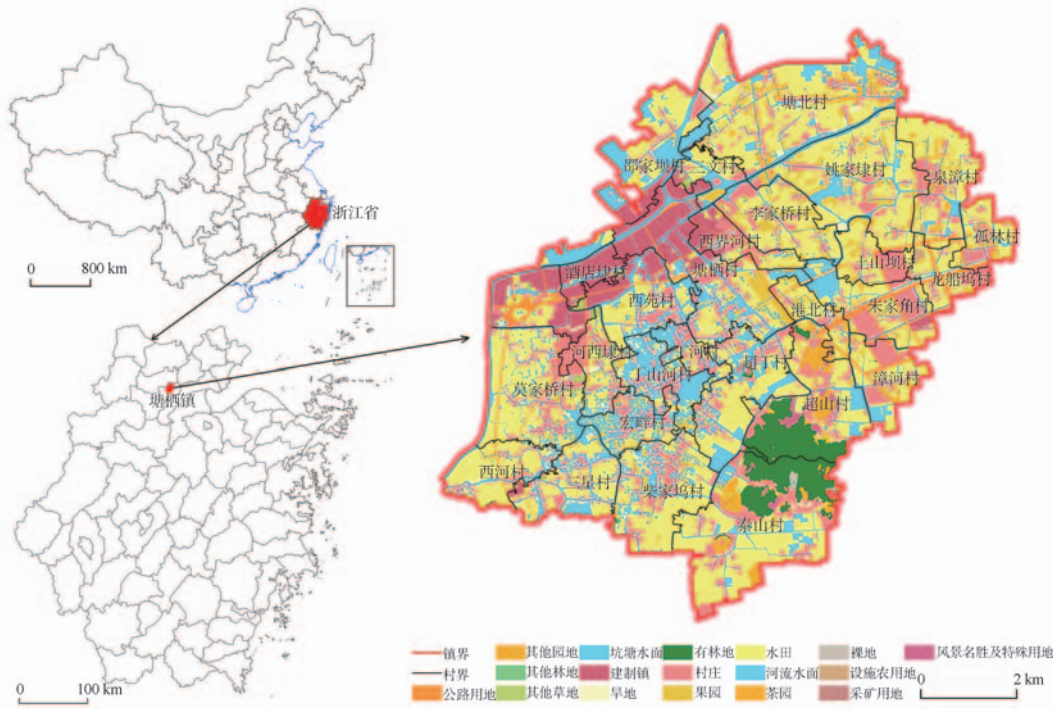


图1 研究区区位图及2009年土地利用现状图  
Fig. 1 Location and land-use map of Tangqi Town in 2009

利用调查的限制运用了8个大类38个二级类的分类体系)的功能形态进行定性识别。

**3.2.1 生态空间功能定量测度方法** 按照功能分类体系我们对生物物理测算方法进行了系统总结。功能体系中的9种功能类型有8种类型已经有了较为成熟的测算方法。缓和突发事件功能由于缺乏成熟的测度方法,此处应用TEEB的价值转换方法对此进行测算。对其他8种功能类型经济价值的测算方法总结如表3所示。

**3.2.2 生产空间功能定量测度方法** 生产功能体系中具有10种功能类型,其中8种功能类型的经济价值测算可以计量表达,其他2种功能价值量通过价值转化方法计算,具体总结如表4所示。

**3.2.3 生活空间功能定量测度方法** 生活功能体系中具有10种功能类型,其中5种功能类型的经济价值核算可以实现计量测算,其他4种通过生态系统服务价值转换方法计算,具体总结如表5所示。

**3.3 生态—生产—生活空间主导功能识别方法**

理论上按照组合规律城市生态—生产—生活空间功能组合模式共有25种(图2)。为了量化城市三生空间多功能性,以城市生态—生产—生活空间功能分类体系为基础,依据城市生态—生产—生活空间功能初步识别结果,对各种地类的各项功能价值量分别进行定量化核算,再根据价值量的对比来最终确定各地类的主导功能形态和多功能性的组合情况。同时,为了提高功能识别的稳健性,以TEEB数据库的研究案例为参照,进行综合对比分析和校正。以生态、生产和生活功能为单元分别汇总每一地类的价值量;对比不同地类的生态、生产和生活功能价值量的大小;确定该地类的主导功能、次级功能和副级功能,对照理论功能组合类型,确定地类的功能组合类型。

表3 生态空间功能定量测度模型

Tab. 3 Quantitative measure model for ecological space function

功能类型	公式	解释	来源
气体调节功能	$V_{i,O_2} = V_{i,O_2,NPV} \times \left\{ r \times (1+r)^t / [(1+r)^t - 1] \right\}$ $V_{O_2,NPV} = \frac{(V_1O_2 + V_2O_2)}{2} \times \frac{1}{(1+r)^t}$ $V_1O_2 = QO_2 \times S_1O_2$ $V_2O_2 = QO_2 \times S_2O_2$ $QO_2 = 1.2 \times \sum_i NPP_i$	$V_{i,O_2}$ 为第 $i$ 种土地利用的释放氧气单位年价值量; $V_{i,O_2,NPV}$ 为释放氧气的净现值; $V_1O_2$ 为采用造林法测算的释放氧气价值; $V_2O_2$ 为采用工业制氧法测算的释放氧气价值; $r$ 为社会折旧率, $t$ 可以视为土地利用用途不变的时间, 此处 $r$ 为 0.07, $t$ 为 10; $QO_2$ 为氧气释放物质量, 一般通过 NPP(净初级生产力)来计算; 1.2 是生产 1 g 植物干物质能释放氧气的数量; $S_1O_2$ 为氧气单位释放量的造林成本(元/t), 由 1989 年造林成本为 260.9 元/t C (参见中国林业统计年鉴, 1990 年), 可以推算出 2009 年的价格为 646.29 元/t C; $S_2O_2$ 为氧气单位释放量的工业制氧成本(元/a), 1991 年工业制氧成本为 0.4 元/kg (参见中国统计年鉴, 1992 年), 可以推算出 2009 年价格为 0.99 元/kg; $NPP_i$ 是第 $i$ 种植被单位面积净初级生产力。	[32-33]
气候调节功能	$V_{i,C} = V_{i,C,NPV} \times \left\{ r \times (1+i)^t / [(1+r)^t - 1] \right\}$ $V_{i,C,NPV} = (V_{i,C,market} + V_{i,C,social}) \times \frac{1}{(1+r)^t}$ $V_{i,C,market} = (Q_{A,i} + Q_{B,i} + Q_{S,i}) \times \frac{NPP_i}{NPP_{mean}} \times C_c$ $V_{i,C,social} = (Q_{A,i} + Q_{B,i} + Q_{S,i}) \times Cost(P_c)$	$V_{i,C}$ 为单位碳固定和储存的年价值; $V_{i,C,NPV}$ 为单位碳固定和储存的净现值; $r$ 为社会折旧率; $t$ 可以视为土地利用用途不变的时间; $V_{i,C,market}$ 为市场价值; $V_{i,C,social}$ 为社会价值; $Q_{A,i}$ 是第 $i$ 类土地利用方式单位面积地表碳固定和储存量; $Q_{B,i}$ 为单位面积地下碳固定和储存量; $Q_{S,i}$ 为单位面积土壤有机碳固定和储存量; $C_c$ 为瑞典碳税率, 40.5 美元/t, 换算为人民币为 251.72 元/t (2009 年); $Cost(P_c)$ 为碳固定和储存的社会成本。 $Q_{A,i}$ 、 $Q_{B,i}$ 和 $Q_{S,i}$ 的单位面积数量值参考 Leh 等的研究; $Cost(P_c)$ 参考 InVEST 的设定方法, 100 美元/t (2009 年)左右, 换算为人民币为 621 元/t。	[34-35]
水调节功能	$V_{i,w} = V_w \times \left\{ r \times (1+r)^t / [(1+r)^t - 1] \right\}$ $V_w = Q_t \times P \times \frac{1}{(1+r)^t}$ $Q_t = Q_c + Q_l + Q_s$ $Q_c = \varepsilon \times P_y$ $Q_l = G_i \times L_i$ $Q_s = h_i \times f_i$	$V_{i,w}$ 为水源涵养单位年价值(元); $V_w$ 为水源涵养总价值(元); $r$ 为社会贴现率, $t$ 为项目运行年限(a), 折现率一般为 0.07, 水库使用年限按 20a 计算; $P$ 为单位水库库容造价, 根据 1993-1999 年《中国水利年鉴》平均水库库容造价为 2.17 元/t, 推算得到单位库容造价为 7.14 元/t (2009 年); $Q_t$ 为水源涵养总量; $Q_c$ 为树冠截水量; $\varepsilon$ 为树冠截水率; $P_y$ 为年降水量; $Q_l$ 为枯枝落叶层持水量; $G_i$ 为枯枝落叶层干重; $L_i$ 为枯枝落叶层饱和持水率; $Q_s$ 为土壤层持水量; $h_i$ 为第 $i$ 种土壤厚度; $f_i$ 为第 $i$ 种土壤的粗孔隙率。	[36-37]
水和废物净化功能	$V_x = Cost(p) \times Retention \times \sum_{i=0}^{T-1} \frac{1}{(1+r)^i}$ $Retention = ALV_x \times filtration$ $ALV_x = \left( \frac{\lambda_x}{\lambda_a} \right) \times pol_x$ $\lambda_a = \log(\sum Y)$	$V_x$ 为水质和废物净化年价值量; $Cost(p)$ 为污染物处理成本, 以最终污染物过滤量为单位, 目前全国单位面积最终污染物处理成本为 300 元/t; $Retention$ 为污染物过滤量; $r$ 为贴现率, 一般为 0.07; $T$ 为污水处理厂使用年限, 此处设为 20a; $ALV_x$ 为调整后的污染物载重量; $filtration$ 为污染物过滤能力; $\lambda_x$ 为径流系数 $\lambda_a$ 为平均径流系数, 通过两者计算水文敏感分值; $pol_x$ 为污染物产出系数; $\lambda_a$ 为地表径流系数计算的一般公式, 其中 $Y$ 为产水量。相关参数设定参考 Leh 等的研究附录。	[19, 34]
缓和突发事件功能	$V_{i,e} = V_{mean,i} \times f(v\_index_i, R_i)$	$V_{i,e}$ 为第 $i$ 种土地利用缓和突发事件年价值; $V_{mean}$ 为 TEEB 全球范围内计算得到的第 $i$ 类土地利用方式缓和突发事件年价值; $v\_index$ 为第 $i$ 类土地利用方式的脆弱性指数, 用于说明第 $i$ 类土地利用方式的整体状况, 一般取值为 0~1; $R$ 为第 $i$ 类土地利用方式的恢复力, 用于表征缓和突发事件的效率水平, 一般取值为 0~1。	
授粉功能	$V_{i,hb} = \sum_{i=1}^n (V_i \times D_i \times P_i)$ $D_i = (Y_0 - Y_g) / Y_0$	$V_{i,hb}$ 为每年农作物授粉产生的经济价值; $V_i$ 为农作物年产量; $D_i$ 为农作物昆虫授粉依存度; $P_i$ 为农作物产品价格; $D_i$ 为授粉依存度; $Y_0$ 为开放授粉区农作物产量; $Y_g$ 为无授粉区农作物产量。	[38]



续表 3

功能类型	公式	解释	来源
土壤保持 功能	$S_i = MS_r - MS_f$ $MS(p_i) = \beta_i \times \mu_j \times \sigma_k \times MS(p_i)$ $MS_f = \sum_l MS(p_l)/k$ $MS_r = \sum_j MS(p_j)/h$ $V_{i,5} = (V_{s1} + V_{s2} + V_{s3}) \times \{r \times (1 + r)^t / [(1 + r)^t - 1]\}$ $V_{s1} = R_i \times (1/n_i) \times P_i$ $V_{s2} = Cost_i / (10^4 \times \rho_i \times h_i)$ $V_{s3} = 0.24 \times C / \rho_i$	<p><math>S_i</math>为土壤流失减少量(<math>m^3/a</math>);<math>MS_r</math>和<math>MS_f</math>分别为无植被覆盖和有植被覆盖的土壤侵蚀模数;<math>MS(p_i)</math>是第<i>i</i>类植被—土壤—坡度复合的土壤侵蚀模数的计算公式;<math>\beta_i</math>为植被参数(<math>i=1, 2, 3 \dots 6</math>);<math>\mu_j</math>为土壤参数(<math>j=1, 2, 3 \dots 5</math>);<math>\sigma_k</math>为坡度参数(<math>k=1, 2, 3</math>);<math>MS(p_5)</math>为标准植被—土壤—坡度复合状态下的侵蚀模数;<math>k</math>和<math>h</math>分别为有植被和无植被总数;<math>V_{i,5}</math>为第<i>i</i>种土地利用的单位年价值(<math>r</math>和<math>t</math>的设置同前式);<math>V_{s1}</math>为保持土壤养分的单位价值;<math>R_i</math>为单位质量土壤中养分(碱解氮、速效磷、速效钾)的平均含量(<math>t</math>);<math>n_i</math>为土壤中碱解氮、速效磷、速效钾分别在磷酸二胺和氯化钾中的含量,分别为14%、15%和60%;<math>P_i</math>为化肥(磷酸二胺、氯化钾)价格(元/<math>t</math>),2009年价格分别为3500元/<math>t</math>、2900元/<math>t</math>; <math>V_{s2}</math>为减少废弃土地的单位价值;<math>\rho_i</math>为土壤容重(<math>t/m^3</math>);<math>h_i</math>为土壤厚度(<math>m</math>);<math>Cost_i</math>为第<i>i</i>种土地利用方式单位面积的机会成本,或者第<i>i</i>种土地利用方式的年均收益(元/<math>hm^2 \cdot a</math>)。 <math>V_{s3}</math>为减少泥沙淤积的单位价值;<math>C</math>为单位库容造价(元/<math>m^3</math>),2009年单位库容造价为7.02元/<math>m^3</math>。</p>	[32, 39]
养分循环 功能	$V_{i,n} = NPP_i \times \left( \frac{N_i C_1}{R_1} + \frac{P_i C_2}{R_2} + \frac{K_i C_3}{R_3} + M_i C_3 \right)$	<p><math>V_{i,n}</math>为<i>i</i>种土地利用类型的单位面积养分循环年价值;<math>NPP_i</math>为年均净初级生产力;<math>N_i</math>、<math>P_i</math>、<math>K_i</math>、<math>M_i</math>分别为不同土地利用方式下土壤中氮磷钾和有机质的含量;<math>C_1</math>、<math>C_2</math>、<math>C_3</math>分别为磷酸二胺、氯化钾化肥、有机质价格(元/<math>t</math>),2009年价格分别为3500元/<math>t</math>、2900元/<math>t</math>和500元/<math>t</math>; <math>R_1</math>、<math>R_2</math>、<math>R_3</math>分别为磷酸二胺含氮量、磷酸二胺含磷量、氯化钾含钾量(%),分别为14%、15%和60%。</p>	[40]
初级生产 功能	$NPP = RDI \frac{rR_n(r^2 + R_n^2 + rR_n)}{(R_n + r)(R_n^2 + r^2)} \times \exp[-(9.87 + 6.25RDI)^{0.5}] \times 100$ $R_n = RDI \times r \times L \times 2.38 \times 10^{-4}$ $RDI = 0.629 + 0.237PER - 0.00313PER^2$ $PER = \frac{58.93BT}{TAP}$ $V_{i,NPP} = NPP_i \times P_s \times 1.474 \times 10^{-6}$	<p><math>NPP</math>为净初级生产力(<math>gDWm^{-2}yr^{-1}</math>);<math>r</math>为年均降水量(<math>mm</math>),<math>RDI</math>为辐射干燥指数;<math>R_n</math>为地表截获的净辐射量(<math>Jcm^{-1}yr^{-1}</math>);<math>R_n</math>可以通过<math>PER</math>计算得出,其中<math>PER</math>为蒸散率,通过<math>BT</math>年均温(<math>0^\circ C \sim 30^\circ C</math>)和<math>TAP</math>年均总降水量计算,通过月数据算得;<math>L</math>为潜热(2503 <math>Jg^{-1}</math>);<math>V_{i,NPP}</math>为第<i>i</i>种土地利用类型的单位<math>NPP</math>年价值;<math>NPP_i</math>为净初级生产力;<math>P_s</math>为标准煤价格(元/<math>t</math>),2009年价格为元877元/<math>t</math>(1 <math>g</math>碳相当于2.2 <math>g</math>的有机物质,1 <math>g</math>的有机物质在燃烧释放的能量上相当于0.679 <math>g</math>的标准煤,而1 <math>g</math>碳相当于1.474 <math>g</math> (<math>2.2 \times 0.679</math>)的标准煤)。</p>	[41-43]

## 4 结果与分析

### 4.1 三生空间识别结果

运用生态—生产—生活空间功能测度方法,对研究区17种土地利用类型的空间功能进行识别(表6)。根据每种地类的生态—生产—生活功能单位价值分别识别出每一地类的具体功能类型和主导功能类型。总体结果显示林地、河流水面、坑塘水面和裸地以生态功能为主导;耕地、园地、设施农用地和采矿用地以生产功能为主导;交通运输用地、建制镇、村庄和风景名胜及特殊用地以生活功能为主导。通过功能类型的统计分析并对照理论功能组合类型,发现塘栖镇共涵盖了城市生态—生产—生活空间功能25种组合模式中的7种模式。同时,发现同种一级地类的功能组合模式存在较强的一致性。

为了实现空间功能价值的可视化,借助ArcGIS10.0作为制图平台对三生空间功能价值量的空间分布进行刻画。结果显示生态功能的高值区集聚在研究区的东南部,镇区是低值集中分布区;生产功能总体呈散布状分布,只在局部小区域出现集聚;生活功能高值区集中在镇区,其他区域亦呈分散分布(图3)。总体来看,不同功能空间在分布上存



表4 生产空间功能定量测度模型

Tab. 4 Quantitative measure model for production space function

功能类型	公式	解释	来源
食物、纤维供给以及能源和矿产生产功能	$V_{i,a} = \sum Y_{i,a} \times P_{i,a} - Cost_{i,a}$ $V_{i,f} = \sum Y_{i,f} \times P_{i,f} - Cost_{i,f}$ $V_{i,e} = \sum Y_{i,e} \times P_{i,e} - Cost_{i,e}$ $V_{i,e} = \sum Y_{i,e} \times P_{i,e} - Cost_{i,e}$	$V_{i,a}$ 为第 <i>i</i> 种土地利用食物供给的年价值; $Y_{i,a}$ 为第 <i>i</i> 类可收获食物的单位面积年均产量(kg/hm <sup>2</sup> ); $P_{i,a}$ 为第 <i>i</i> 类食物的当年市场平均价格(元/kg); $Cost_{i,a}$ 为单位面积成本; $V_{i,f}$ 为第 <i>i</i> 种土地利用纤维供给的年价值; $Y_{i,f}$ 为第 <i>i</i> 类可收获纤维的单位面积年均产量(kg/hm <sup>2</sup> ); $P_{i,f}$ 为第 <i>i</i> 类纤维的当年市场平均价格(元/kg); $Cost_{i,f}$ 为单位面积成本; $V_{i,e}$ 为第 <i>i</i> 种土地利用方式能源供给的年价值; $Y_{i,e}$ 为第 <i>i</i> 类土地利用的能源产出功能量; $P_{i,e}$ 为第 <i>i</i> 类能源的当年市场平均价格; $Cost_{i,e}$ 为单位面积能源的获取成本。 $V_{i,e}$ 为第 <i>i</i> 种土地利用方式下矿产供给的年价值; $Y_{i,e}$ 为第 <i>i</i> 类土地利用方式下的矿产产出量; $P_{i,e}$ 为第 <i>i</i> 类矿产的当年市场平均价格; $Cost_{i,e}$ 为单位面积矿产的获取成本。	
淡水供给功能	$V_{i,w} = Y_{ij} \times WP; Y_{ij} = (1 - \frac{AET_{sj}}{P_x}) \times P_x$ $\frac{AET_{sj}}{P_x} = \frac{1 + \omega R_{sj}}{1 + \omega R_{sj} + \frac{1}{R_{sj}}}; R_{sj} = \frac{k_{sj} \times ET_0}{P_x}$ $\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x}$	$Y_{ij}$ 为产水量; $WP$ 为单位面积水价,2009年均价为2.5元/t; $Y_{ij}$ 为 <i>x</i> 土地覆被类型 <i>j</i> 年产水量; $AET_{sj}$ 为 <i>x</i> 土地覆被类型 <i>j</i> 年蒸散发量; $P_x$ 为年均降水量; $\omega$ 为修正植被年可利用水量与预期降水量的比值; $R_{sj}$ 为 <i>x</i> 土地覆被类型 <i>j</i> 的Budyko干燥指数(实际蒸散与降水的比值),无量纲; $k_{sj}$ 为植被蒸散系数; $ET_0$ 为参考作物蒸散; $Z$ 为Zhang系数,此处为3.33; $AWC_x$ 为土壤有效含水量;相关参数设定参考Leh等的设定方法。	[34]
药物供给功能	$V_{i,m} = V_{mean,i} \times f(adjustment index_i)$	$V_{i,m}$ 为第 <i>i</i> 类土地资源产出药物资源的年价值; $V_{mean,i}$ 为TEEB统计的全球范围内的平均值; $f(adjustment index_i)$ 是根据当地调查了解到的药物资源种类、产量等而设定的调整系数。	
基因资源供给功能	$V = (H \times C_1 + P \times 1.26 \times 10^{25}) \times C_2 / A$ $H = \sum_{i=1}^k N_i / N \log_2 N_i / N$ $P = (m/M) \times (t/12) \times (s/S)$	$H$ 为Shannao-Wearer指数; $C_1$ 为bits转化率,为 $5.78 \times 10^{13}$ , $C_2$ 为能值—经济值转化率,为 $8.67 \times 10^{12}$ ; $P$ 为珍稀物种支持率; $A$ 为调查总面积; $N_i$ 为第 <i>i</i> 种物种的个体数; $N$ 是 <i>S</i> 个物种的总个体数; $m$ 为生态系统中珍稀物种个体数; $M$ 为地球上珍稀物种总数; $t$ 为珍稀物种一年内在该生态系统中生活的时间(月); $s$ 为该系统面积; $S$ 为 <i>t</i> 时间内物种个数的实际活动面积。	[44]
木材供给功能	$VH_i = Perc\_harv_i \times Perc\_avail_i \times Price_i \times Accum\_mass_i - Harv\_cost_i$	$VH_i$ 为单位面积可收获木材的净值; $Perc\_harv_i$ 为可收获的木材比例; $Perc\_harv_i$ 为综合出材率; $Price_i$ 为木材市场价格,2009年原木价格为2800元/m <sup>3</sup> ; $Accum\_mass_i$ 为单位面积木材蓄积量; $Harv\_cost_i$ 为单位面积木材年收获成本。	[34]
装饰资源供给功能	$V_{i,o} = V_{mean,i} \times f(adjustment index_i)$	$V_{i,o}$ 为第 <i>i</i> 类土地资源产出装饰资源的年价值; $V_{mean,i}$ 为TEEB统计的全球范围内的平均值; $f(adjustment index_i)$ 是根据当地调查了解到的装饰资源的种类、产量等而设定的调整系数。	
商品与服务产品生产功能	$V_{i,land} = V_{i,b,price} \times (1 + \sum K_{i,factors}) \times Y_{i,year} \times D_{i,data} \times R_{i,plot\ ratio}$ $V_{i,land} = (E_{i,a} + E_{i,d} + T + R_{i,1} + R_{i,2} + R_{i,3}) \times S \times K$	$V_{i,land}$ 为待估宗地价格; $V_{i,b,price}$ 为待估宗地所处区的基准地价; $K_{i,factors}$ 为各影响因素修正系数之和,包括区域因素(城市繁华程度及区域在城市中的位置交通条件、公共及基础设施水平、区域环境条件、土地使用限制和自然条件等)和个别因素(与宗地直接有关的自然条件、市政设施条件、宗地面积、形状、长度、宽度、地质条件、使用限制和宗地位置等); $Y_{i,year}$ 为年期修正系数,一般为 $Y_{i,year} = [1 - 1/(1+r)^n] / [1 - 1/(1+r)^m]$ , $m$ 为待估宗地的使用年期; $n$ 为基准地价设定的使用年期; $D_{i,data}$ 为期日修正系数, $D_{i,data} = Q_i / Q_0$ , $Q_i$ 为估价期日地价指数, $Q_0$ 为基准地价估价期日地价指数; $R_{i,plot\ ratio}$ 为容积率修正系数, $R_{i,plot\ ratio} = R_i / R_0$ , $R_i$ 为待估宗地容积率, $R_0$ 为基准地价设定的容积率。 $E_{i,a}$ 为土地取得费; $E_{i,d}$ 为土地开发费; $T$ 为税费; $R_{i,1}$ 为利息; $R_{i,3}$ 为利润; $R_{i,3}$ 为土地增值; $S$ 为个别修正系数; $K$ 为年期修正系数。	

表5 生活空间功能定量测度模型

Tab. 5 Quantitative measure model for living space function

功能类型	公式	解释	来源
居住承载功能	$V_{i,land} = V_{i,b\_price} \times (1 + \sum K_{i,factors}) \times Y_{i,year} \times D_{i,data} \times R_{i,plot\ ratio}$ $V_{i,land} = (Cost_i + R_i) \times S \times K$ <p>(乡村宅基地价格核算)</p>	$V_{i,land}$ 为待估宗地价格; $V_{i,b\_price}$ 为待估宗地所处区的基准地价; $K_{i,factors}$ 为各影响因素修正系数之和,包括区域因素和个别因素; $Y_{i,year}$ 为年期修正系数; $m$ 为待估宗地的使用年期; $n$ 为基准地价设定的使用年期; $D_{i,data}$ 为期日修正系数; $R_{i,plot\ ratio}$ 为容积率修正系数; $Cost_i$ 为土地成本价格,成本无法核算的可以运用当地征地补偿标准(每年)替代; $R_i$ 为土地增值; $S$ 为个别修正系数; $K$ 为年期修正系数。	
交通与公共服务承载功能	$V_{i,land} = \bar{P}_i \times S \times D$	$V_{i,land}$ 为待估用地价格; $\bar{P}$ 为待估用地所处区周边用地的平均价格; $S$ 为个别修正系数; $D$ 为区域修正系数。	
基本生活保障功能	$V_i = P_i \times L / K$	$V_i$ 为基本生活保障功能价值; $P_i$ 为第 <i>i</i> 种土地利用方式的人口承载力; $L$ 为研究区相应年份的城镇最低生活保障水平(元/人·a); $K$ 为相应年份城市居民人均可支配收入与农民人均纯收入的比例,即城农收入比。	[45]
就业保障功能	$V_w = (P_0 - P_i) \times B / K$	$V_w$ 为失业保险功能价值; $P_0$ 为人口承载力,中国土地资源在中等投入水平下人口承载力为3.68~5.51人/hm <sup>2</sup> ,此处取5人/hm <sup>2</sup> ; $P_i$ 为土地资源的最小承载力,此处取3.68人/hm <sup>2</sup> 。 $B$ 为研究区相应年份的城镇失业保险金标准(元/人·a)。 $K$ 为相应年份城市居民人均可支配收入与农民人均纯收入的比例,即城农收入比。	[45]
休闲功能	$P_{travel} = T_{cap} \times I_i \times T_i^{-1} \times l / A_i$ $l = L \times (1 + ae^{-bt})^{-1}$ $t = En^{-1} - 3$	$P_{travel}$ 为研究区休闲价值; $T_{cap}$ 为研究区总体旅游环境容量; $I_i$ 为研究区第 <i>i</i> 年的旅游收入; $T_i$ 为第 <i>i</i> 年的游客总量; $l$ 为社会发展阶段系数; $L$ 为极富阶段的支付意愿,取值为1; $t$ 为时间变量,表示社会发展阶段; $a$ 、 $b$ 为常数,取值为1; $e$ 为自然对数; $En$ 为恩格尔系数, $A_i$ 为旅游区的总面积(hm <sup>2</sup> )。	[33]
科学和教育、文化和艺术、美学功能、精神和历史功能	$V_{i,SE} = V_{mean,i} \times f(\text{adjustment index}_i)$ $V_{i,EA} = V_{mean,i} \times f(\text{adjustment index}_i)$ $V_{i,AES} = V_{mean,i} \times f(\text{adjustment index}_i)$ $V_{i,SH} = V_{mean,i} \times f(\text{adjustment index}_i)$	$V_{i,c}$ 为第 <i>i</i> 类土地资源具有的科学和教育、文化和艺术、美学功能、精神和历史的年价值; $V_{mean,i}$ 为TEEB统计的全球范围内第 <i>i</i> 类服务的平均值; $f(\text{adjustment index}_i)$ 是根据当地调查了解到的级别、功能量、文化艺术价值等信息而设定的调整系数。	

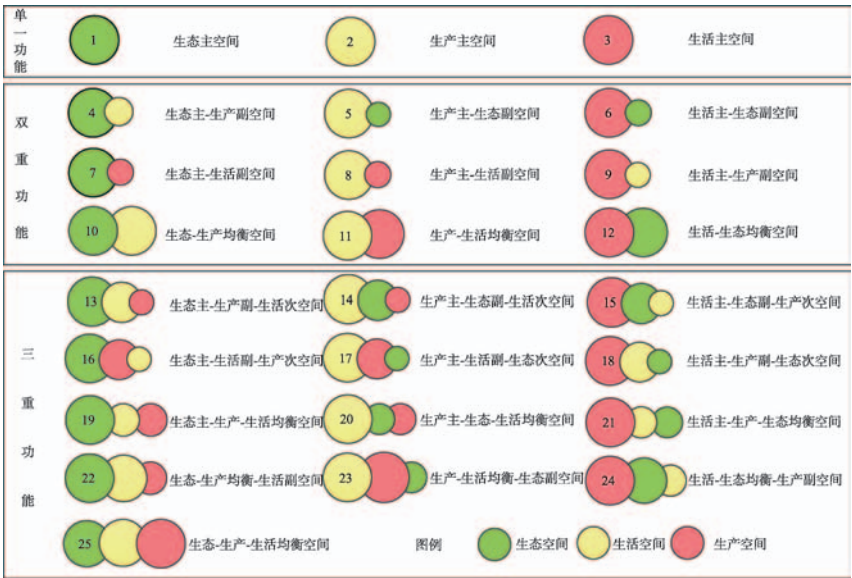


图2 城市生态—生产—生活空间功能组合模式

Fig. 2 Function composite patterns of urban ecological-production-living spaces

表6 塘栖镇生态—生产—生活空间识别结果

Tab. 6 Identification result of ecological-production-living spaces in Tangqi Town

一级类		二级类		生态功能单位 价值(元/hm²)	生产功能单位 价值(元/hm²)	生活功能单位 价值(元/hm²)	主导 功能	具体功能 识别	具体组合模式
01	耕地	011	水田	19289	64637	17244	2	1 2 3	生产主—生态副—生活次空间
		013	旱地	15607	26487	15564	2	1 2 3	生产主—生态副—生活次空间
02	园地	021	果园	45270	87343	20517	2	1 2 3	生产主—生态副—生活次空间
		022	茶园	25894	36666	15967	2	1 2 3	生产主—生态副—生活次空间
		023	其他园地	29457	35157	15836	2	1 2 3	生产主—生态副—生活次空间
03	林地	031	有林地	60250	28172	21576	1	1 2 3	生态主—生产副—生活次空间
		033	其他林地	21522	18187	16664	1	1 2 3	生态主—生产副—生活次空间
04	草地	043	其他草地	10363	9332	9767	1	1 2 3	生态主—生产副—生活次空间
10	交通运输用地	102	公路用地	0	88991	153977	3	2 3	生活主—生产副空间
11	水域及水利设施用地	111	河流水面	12589	10149	8772	1	1 2 3	生态主—生产副—生活次空间
		114	坑塘水面	7983	0	0	1	1	生态主空间
12	其他土地	122	设施农用地	12612	136600	0	2	1 2	生活主—生态副空间
		127	裸地	3217	0	0	1	1	生态主空间
20	城镇村及工矿用地	202	建制镇	0	22235	690366	3	2 3	生活主—生产副空间
		203	村庄	0	285514	217508	3	2 3	生活主—生产副空间
		204	采矿用地	0	8710	0	2	2	生产主空间
		205	风景名胜及特殊用地	18024	21600	348217	3	1 2 3	生活主—生态副—生产次空间

注：主导功能类型中1代表生态功能，2代表生产功能，3代表生活功能；红色代表主导功能，橘黄代表辅助功能，浅绿代表次级功能。

在一定的局部集聚性。因此，有必要对其空间集聚性进行深入分析。

从三生空间结构来看，生产空间占塘栖镇镇域总面积的48.83%，生态空间和生活空间的比例较为接近，分别占26.51%和24.66%，生产空间占据主导地位（图4）。这一格局表明追求生产功能是当前社会经济发展阶段对空间功能的客观要求。从三生空间演进的角度来看，不同空间在不同发展阶段可能被赋予了不同的功能形态，同时也具有一定的演进规律性。从空间的多功能性来看，超过90%的空间存在双重或三重功能，多功能性十分显著。多种功能混杂和交织在一定程度上可能有助于缓解功能单一造成的景观失衡，但同时也往往存在冲突、矛盾和负向影响。因此，对空间多功能性进行定量识别和综合权衡是不同功能空间科学利用的客观要求。

4.2 三生空间邻域分析与集聚分析

探索不同类型空间功能的毗邻状态和融合程度是从图斑层面进一步剖析空间功能的



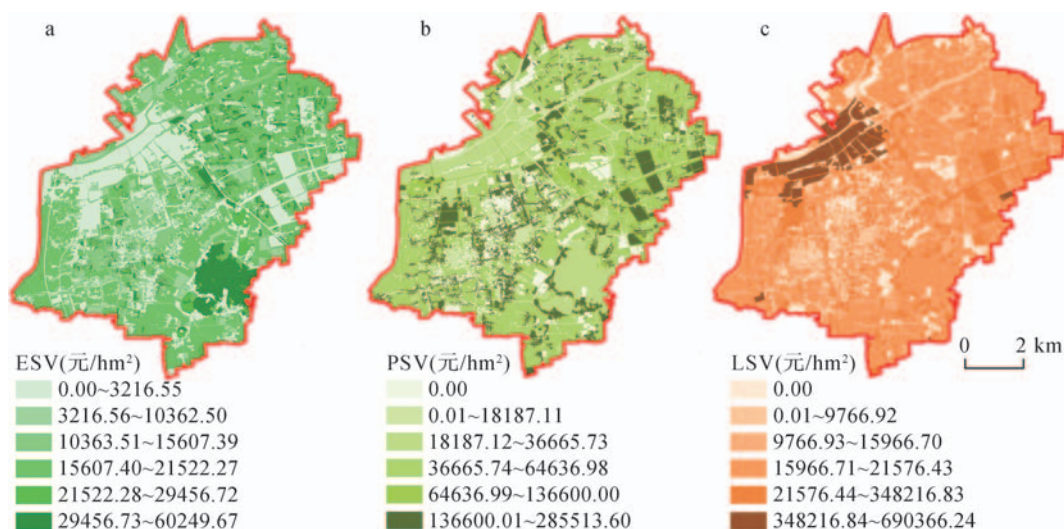


图3 塘栖镇生态—生产—生活价值量空间分布示意图

Fig. 3 Spatial distribution of ecological-production-living value in Tangqi Town

重要内容之一。此处运用 ArcGIS 邻域分析方法对三生空间主导功能和具体功能的邻域性分别进行刻画。以三生空间主导功能和具体功能为基础的邻域分析结果表明,图斑的大小与空间功能邻接关系密不可分。图斑面积大毗邻不同空间功能的概率亦会增加,空间功能的互补性也会明显增加(图5)。因此,图斑面积是影响空间功能邻接性和模式组合的重要因素之一。主导功能邻域分析显示生态空间处于邻域空间功能类型的高值区,一般毗邻2~3种空间功能类型;生产空间毗邻的空间功能类型相对单一,一般为1类,仅在图斑交界处有2~3类的邻接;生活空间邻域的空间功能类型基本为1~2种,与生态空间的毗邻稍多于生产空间(图5c)。具体空间功能邻域分析结果显示,大部分邻域空间功能数集中在1~3类间;3~4类区域集中分布在东南部超山风景区和部分河网密布区;4~7类区域零星散布在大图斑周围(图5d)。由此可见,塘栖镇三生空间的整体毗邻性较低,空间功能的互补和融合性不佳。因此,有必要在镇域空间规划中充分考虑这一问题,通过不同景观要素的优化布局来增强不同空间的匹配和融合。

图斑尺度空间现象是否存在空间自相关和空间集聚规律往往是空间规划需要回答的问题。为了考察三生空间功能的微观分布规律,运用 ArcGIS 热点分析工具对三生空间功能的集聚性进行识别。具体是以生态—生产—生活空间三大功能为基础(生态、生产和生活空间功能分别用1、2和3代表),识别出塘栖镇空间功能集聚的冷点和热点区域(图6)。分析结果进一步印证塘栖镇三生空间功能存在一定的空间集聚性。冷点区域明显集聚在中部区域,该区域存在低值集聚,而且显著性较高。从土地利用类型来看,该区域是河流、坑塘水面和农村居民点集聚地区。这种典型的江南水乡景观类型可能是导致空间功能集聚的主要原因。而热点区域散布在生活空间,镇区和面积较大的居民点均存在一定的空间集聚性。另外,生产空间也存在显著的连片集聚现象。因此,从空间规划的视角来看,空间功能集聚分析可以作为空间功能分区的有力支撑。

## 5 讨论与结论

论文从土地功能、生态系统功能和景观功能综合的视角构建了城市生态—生产—生

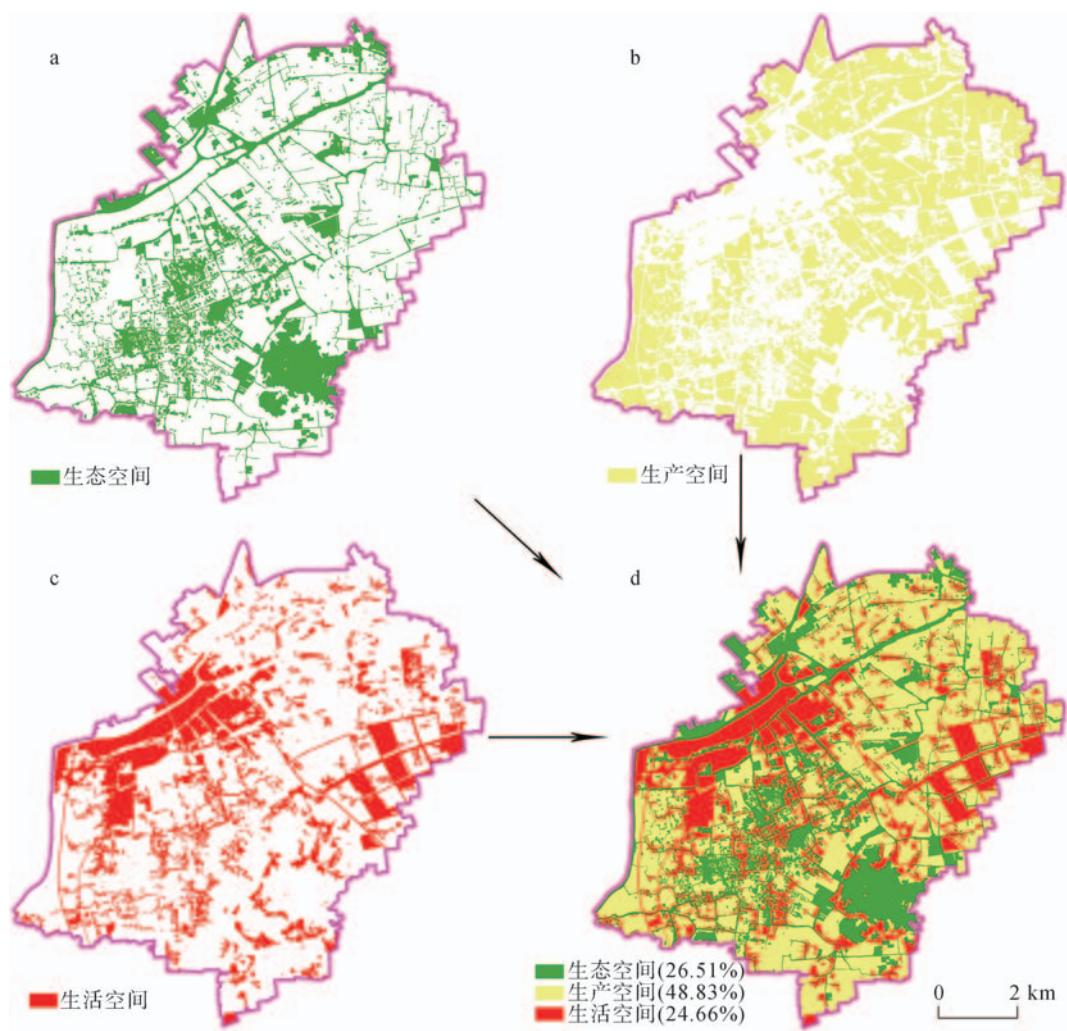


图4 塘栖镇生态—生产—生活空间分布示意图

Fig. 4 Spatial distribution of ecological-production-living spaces in Tangqi Town

活空间功能分类体系。该体系涵盖3个一级类和29个二级功能类，是目前较为综合的空间分类体系。依托该体系首先对基于第二次土地利用调查分类的城市生态—生产—生活空间功能进行识别。同时为了弥补定性识别的缺陷，以空间功能价值的货币化为手段，从生态—生产—生活的角度构建了三生空间功能价值定量测度函数群。生态功能以生态系统服务价值评估为基础测度了广泛认可的9种生态系统功能价值量。生产功能在借鉴生态系统服务供给功能和景观功能的基础上增加了能源、矿产和商品与服务产品生产3项功能，构建了10项生产功能价值测度函数子集。生活功能以满足人类生活需求为目标，构建了9种生活功能的测度函数子集。进而探讨了城市生态—生产—生活空间的主导功能识别方法和功能组合模式。从三生空间的组合关系来看，理论上存在25种功能组合模式。

在理论研究的基础上以杭州市塘栖镇为案例区实证分析了城市三生空间功能定量识别方法，并对三生空间功能的邻域性和集聚性进行了分析。从实证分析来看，分析结果与预期假设吻合度较高，表明三生空间功能分类体系反映了不同地类的功能类型。同



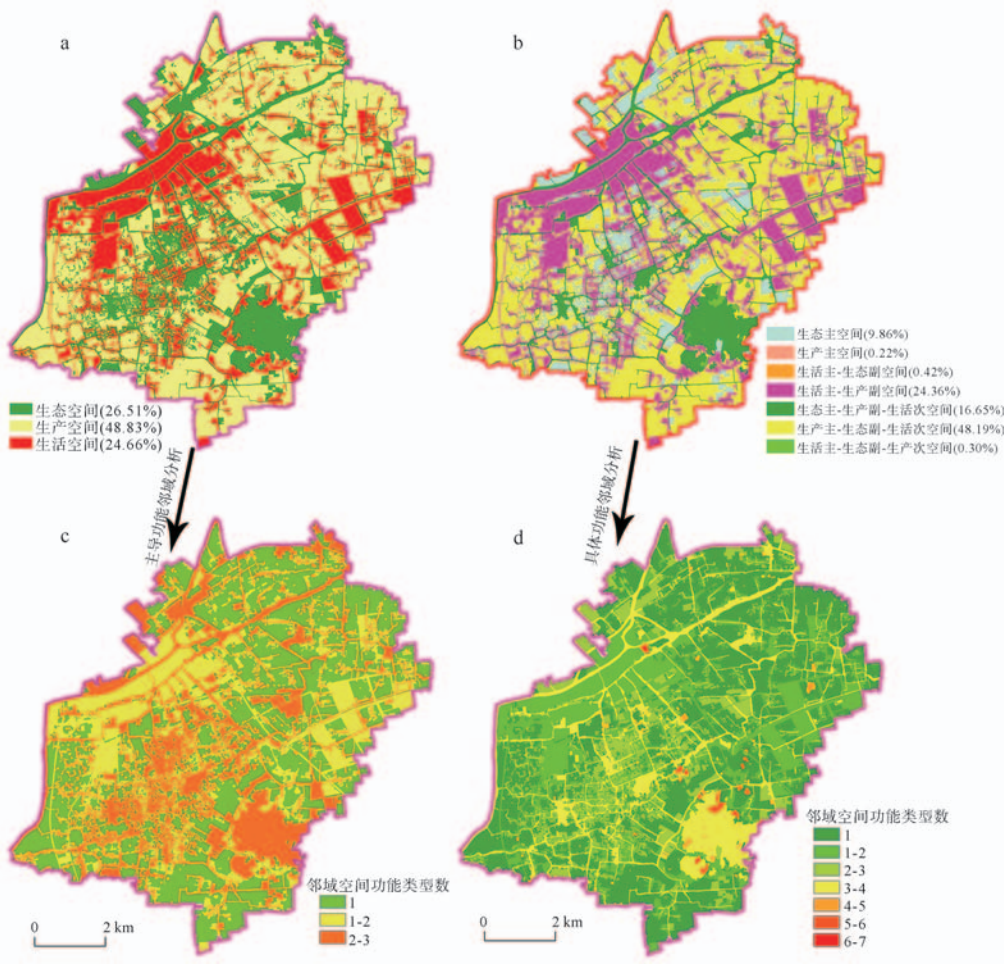


图5 塘栖镇生态—生产—生活空间细分及空间功能邻域分析示意图

Fig. 5 Ecological-production-living spaces subdivision and neighborhood analysis in Tangqi Town

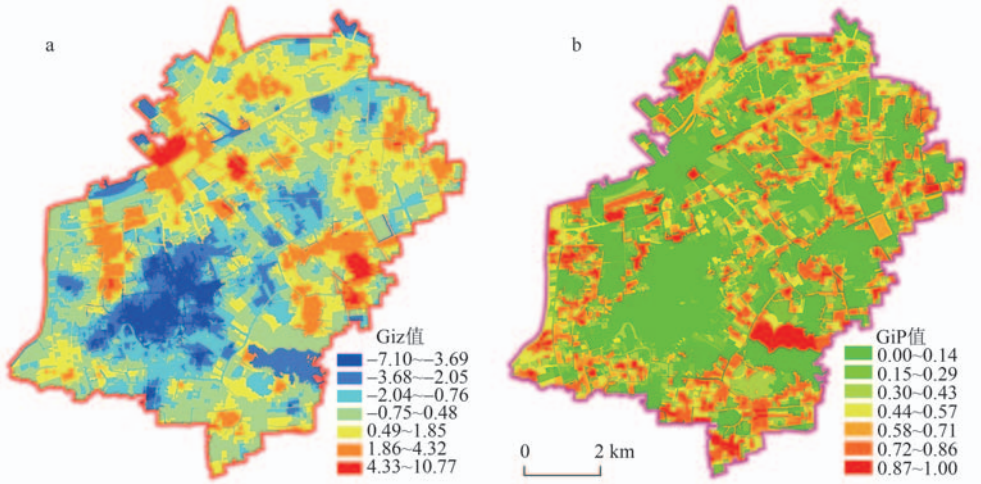


图6 塘栖镇生态—生产—生活空间热点区识别示意图

Fig. 6 Hotspot identification of ecological-production-living spaces in Tangqi Town



时, 空间主导功能的识别也与不同地类的功能基本匹配。从实践出口来看, 该项研究对区域和城市空间规划实践具有较强的指导意义和较高的应用价值。

同时, 在理论和实证分析中也发现了一些尚未解决的难点问题和可能存在的偏差。首先, 生态系统服务价值评估的不确定性和空间异质性是当前较难回答的两大问题。因而, 在一定程度上城市三生空间功能价值量的测算以及主导功能的识别都可能受到影响, 如何提高分析结果的稳健性有待继续研究。其次, 微观图斑尺度的空间分析和动态变化研究有待深入, 图斑尺度的三生空间功能类型组合规律也有待深入研究。再次, 虽然该研究具有较强的实践指导意义, 但仍需要不同类型的研究案例来检验理论的可行性, 特别是通过全国不同自然环境、城镇化发展阶段和经济发展阶段的样点来对比分析确定实践的调整方向。

最后, 因三生空间功能量化涉及城市巨系统, 未来仍需进一步强化三生空间功能的综合定量研究。同时, 三生空间功能的综合量化仍需与城市问题(城市水问题、土地问题、生态问题等)紧密结合, 为城市增长边界和生态保护红线划定以及海绵城市和生态城市发展等提供参考。

### 参考文献(References)

- [1] Verburg P H, Van De Steeg J, Veldkamp A, et al. From land cover change to land function dynamics: A major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(3): 1327-1335.
- [2] European Commission. Safeguarding the multifunctional role of agriculture: Which instruments? Brussels: DG Agriculture-European Commission, 1999.
- [3] Abler D. Multifunctionality, Agricultural policy and environmental policy. *Agricultural and Resource Economics Review*, 2004, 33(1): 8-17.
- [4] Andersen P S, Vejre H, Dalgaard T, et al. An indicator-based method for quantifying farm multifunctionality. *Ecological Indicators*, 2013, 25: 166-179.
- [5] Xie G, Zhen L, Jochen K H, et al. Assessing the multifunctionalities of land use in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(4): 311-318.
- [6] Gómez-Limón J A, Vera-Toscano E, Rico-González M. Measuring individual preferences for rural multifunctionality: The importance of demographic and residential heterogeneity. *Journal of Agricultural Economics*, 2012, 63(1): 1-24.
- [7] Mittenzwei K, Fjellstad W, Dramstad W, et al. Opportunities and limitations in assessing the multifunctionality of agriculture within the CAPRI model. *Ecological Indicators*, 2007, 7(4): 827-838.
- [8] Peng Jian, Liu Zhicong, Liu Yanxu. Research progress on assessing multi-functionality of agriculture. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(6): 1-8. [彭建, 刘志聪, 刘焱序. 农业多功能性评价研究进展. *中国农业资源与区划*, 2014, 35(6): 1-8.]
- [9] Wiggering H, Müller K, Werner A, et al. The concept of multifunctionality in sustainable land development//Katharina Helming, Wiggering H. *Sustainable Development of Multifunctional Landscapes*. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003.
- [10] Paracchini M L, Pacini C, Jones M L M, et al. An aggregation framework to link indicators associated with multifunctional land use to the stakeholder evaluation of policy options. *Ecological Indicators*, 2011, 11(1): 71-80.
- [11] Wiggering H, Dalchow C, Glemnitz M, et al. Indicators for multifunctional land use: Linking socio-economic requirements with landscape potentials. *Ecological Indicators*, 2006, 6(1): 238-249.
- [12] Zhang Xiaoping, Zhu Daolin, Xu Zuxue. Assessment on multi-functionality of land use in Tibet. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(6): 185-194. [张晓平, 朱道林, 许祖学. 西藏土地利用多功能性评价. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 185-194.]
- [13] Lv Yihe, Ma Zhimin, Fu Bojie, et al. Diversity of ecosystem services and landscape multi-functionality: From scientific concepts to integrative assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(4): 1153-1159. [吕一河, 马志敏, 傅伯杰, 等. 生态系统服务多样性与景观多功能性: 从科学理念到综合评估. *生态学报*, 2013, 33(4): 1153-1159.]
- [14] Zhen Lin, Wei Yunjie, Xie Gaodi, et al. Regional analysis of dynamic land use functions in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6749-6761. [甄霖, 魏云洁, 谢高地, 等. 中国土地利用多功能性动态的区域分析. *生态学报*,

- 2010, 30(24): 6749-6761.]
- [15] Zhen Lin, Cao Shuyan, Wei Yunjie, et al. Land use functions. *Resources Science*, 2009, 31(4): 544-551. [甄霖, 曹淑艳, 魏云洁, 等. 土地空间多功能利用. *资源科学*, 2009, 31(4): 544-551.]
- [16] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [17] Costanza R, D'arge R. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [18] Egoh B, Reyers B, Rouget M, et al. Mapping ecosystem services for planning and management. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2008, 127(1/2): 135-140.
- [19] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 165: 6-18.
- [20] Gret-Regamey A, Bebi P, Bishop I D, et al. Linking GIS-based models to value ecosystem services in an Alpine region. *Journal of Environmental Management*, 2008, 89(3): 197-208.
- [21] Chen N, Li H, Wang L. A GIS-based approach for mapping direct use value of ecosystem services at a county scale: Management implications. *Ecological Economics*, 2009, 68(11): 2768-2776.
- [22] de Groot R. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75(3/4): 175-186.
- [23] Gulickx M M C, Verburg P H, Stoorvogel J J, et al. Mapping landscape services: A case study in a multifunctional rural landscape in the Netherlands. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 273-283.
- [24] Lovell S T, Desantis S R, Nathan C A, et al. Integrating agroecology and landscape multifunctionality in Vermont: An evolving framework to evaluate the design of agroecosystems. *Agricultural Systems*, 2010, 103(5): 327-341.
- [25] O'farrell P J, Anderson P M L. Sustainable multifunctional landscapes: A review to implementation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, 2(1-2): 59-65.
- [26] Peng Jian, Lü Huiling, Liu Yanxu, et al. International research progress and perspectives on multifunctional landscape. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(4):465-476. [彭建, 吕慧玲, 刘焱序, 等. 国内外多功能景观研究进展与展望. *地球科学进展*, 2015, 30(4): 465-476.]
- [27] Willemsen L, Hein L, Van Mensvoort M E F, et al. Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region. *Ecological Indicators*, 2010, 10(1): 62-73.
- [28] de Groot R, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [29] de Groot R. *Functions of Nature: Evaluation of Nature in Environmental Planning, Management and Decision Making*. Groningen: Wolters-Noordhoff, 1992.
- [30] Willemsen L. Spatial characterization of landscape functions. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 88(1): 34-43.
- [31] de Groot R, Brander L, Van Der Ploeg S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 50-61.
- [32] Guo Z W, Xiao X M, Gan Y L, et al. Ecosystem functions, services and their values: A case study in Xingshan county of China. *Ecological Economics*, 2001, 38(1): 141-154.
- [33] Li Huancheng. GIS-based apporoach for regional ecosystem services valuation: Methodology and applications [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. [李焕承. 基于GIS的区域生态系统服务价值评估方法研究与应用. 杭州: 浙江大学, 2010.]
- [34] Tallis H, Polasky S. Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009, 1162(1): 265-83.
- [35] Shi Longyu, Cui Shenghui, Yin Kai, et al. The impact of land use/cover change on ecosystem service in Xiamen. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(6): 708-714. [石龙宇, 崔胜辉, 尹锴, 等. 厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响. *地理学报*, 2010, 65(6): 708-714.]
- [36] Su C H, Fu B J, He C S, et al. Variation of ecosystem services and human activities. *Acta Oecologica*, 2012, 44: 46-57.
- [37] Lee R. *Forest Hydrology*. New York: Columbia University Press, 1980.
- [38] Liu Pengfei, Wu Jie. Economic values of bee pollination to China's agriculture. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(24): 5117-5123. [刘朋飞, 吴杰. 中国农业蜜蜂授粉的经济价值评估. *中国农业科学*, 2011, 44(24): 5117-5123.]
- [39] Li J, Ren Z Y, Zhou Z X. Ecosystem services and their values. *Ecological Research*, 2006, 21(4): 597-604.
- [40] Li Guang, Huang Gaobao, Wang Qi, et al. Spatial-temporal distribution of the ecological service value and NPP of cultivated land on Longdong Loess Plateau. *Acta Pratacultuae Sinica*, 2011, 20(6): 18-25. [李广, 黄高宝, 王琦, 等. 陇

- 东耕地净第一性生产力及生态服务价值的时空分异研究. 草业学报, 2011, 20(6): 18-25.]
- [41] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, et al. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of China's Larix forests. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1/2): 149-157.
- [42] Zhang G G, Kang Y M, Han G D, et al. Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 377-389.
- [43] Wang Yanyan, Yang Mingchuan, Pan Yaozhong. Valuation of the organic matter produced by terrestrial vegetation ecosystems in China in 1995 based on remote sensing. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(4): 455-459. [王艳艳, 杨明川, 潘耀忠. 中国陆地植被生态系统生产有机物质价值遥感估算. 生态环境学报, 2005, 14(4): 455-459.]
- [44] Zhu Hongguang, Qin Pei, Wan Shuwen, et al. Emergy analysis of two models of wetland utilization on seashore in Jiangsu province. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(1): 38-44. [朱洪光, 钦佩, 万树文, 等. 江苏海涂两种水生利用模式的能值分析. 生态学杂志, 2001, 20(1): 38-44.]
- [45] Li Cuizhen, Kong Xiangbin, Sun Xianhai. Cultivated land resources value system and its evaluation in Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(3): 321-329. [李翠珍, 孔祥斌, 孙宪海. 北京市耕地资源价值体系及价值估算方法. 地理学报, 2008, 63(3): 321-329.]

## Quantitative function identification and analysis of urban ecological-production-living spaces

LI Guangdong<sup>1,2</sup>, FANG Chuanglin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The identifying of land multifunctionality is a basic tool for organization, coordination and configuration of urban land, and is a key criterion for urban land functions forms, composite pattern and dynamic tradeoffs. This topic is of important theoretical and practical significance. An available identification system of urban land multifunctionality, however, had not been built for a long time. This paper develops a function classification system for urban ecological-production-living spaces from an integrated perspective of land function, ecosystem services and landscape function. We integrated a value function group of space function based on ecosystem services valuation. A comparison method of vertical and cross direction is proposed to identify dominant function type of urban land. The empirical results show that in the study area, function classification system of urban ecological-production-living spaces can reflect differentiated function types of different land use classes. The identified result of dominant function for urban space is matched with the functions of different land types. Meanwhile, we also found that there are some problems on urban land use, such as the low adjacency degree with different spaces, and poor complementarity with different space functions. The result indicates that the spatial distribution of urban ecological-production-living spaces is congregated in the study area.

**Keywords:** ecological-production-living spaces; urban area; land function; ecosystem services; landscape function; function identifying; value assessment