

生态系统服务功能动态区划系统及其在鄱阳湖湖区的应用^{*}

史娜娜¹ 战金艳^{1**} 吴 锋² 林英志²

(¹ 北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; ² 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要 生态系统服务功能动态区划系统(SIZES)是自动实现区域生态系统服务功能动态区划边界识别的软件工具,能够辨识区域生态系统服务功能空间分异特征,指导区域生态系统服务功能分区管理。SIZES采用多源数据融合技术,通过分层输入区域生态系统服务功能的表征指标,利用因子分析法与空间模糊聚类分析法实现区域生态系统服务功能动态区划边界的辨识。在案例区鄱阳湖湖区的应用表明,利用SIZES划定的10个生态系统服务功能分区科学、合理地解释了该区生态系统服务功能的空间分异特征,为当地生态系统服务功能分区管理提供了参考信息。

关键词 生态系统服务功能;生态系统服务功能区划;因子分析;空间模糊聚类分析

中图分类号 Q148 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2009)09-1909-06

System for identifying and zoning ecosystem services and its application in Poyang Lake area. SHI Na-na¹, ZHAN Jin-yan¹, WU Feng², LIN Ying-zhi²(¹ State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ² Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). *Chinese Journal of Ecology* 2009 28(9):1909-1914.

Abstract: System for identifying and zoning ecosystem services (SIZES) a software tool for automatically identifying and delimitating the zoning boundaries of ecosystem services divisions, which can identify the spatial heterogeneity of ecosystem services and give guidance to the regional ecosystem management. SIZES integrates multi-source data, and then, identifies the kernel ecosystem services and delimitates the boundaries of ecosystem services by factor analysis and spatial fuzzy clustering analysis after hierarchically inputting relevant indicators. A case study on the application of SIZES in Poyang Lake area showed that the ten ecological zones delimited by the system explained the spatial heterogeneity of ecosystem services of the study area, being helpful to provide valuable spatial and temporal decision-making information for the local ecosystem services management.

Key words: ecosystem services; ecological zones; factor analysis; spatial fuzzy clustering analysis.

生态系统服务功能区划是目前国内外生态学界关注的热点问题之一(Fang *et al.* 2008)。众多国内外学者从各自的研究领域出发开展了大量区域生态系统服务功能区划研究(傅伯杰等 1999 2001 舒若杰等 2006 Shitilkov *et al.* 2007),并取得了一系列的研究成果(范泽孟和岳天祥 2007; Kara & Gul-

er 2007 Sabatini *et al.* 2007)。然而,纵观当前的区域生态系统服务功能区划研究进展,或是侧重于单一生态系统空间区划单元的辨识(Zollner *et al.* 2005; Kara & Guler 2007),或是立足于生态单元内的土地利用区划(Dehring & Lind 2007 Zhou *et al.* 2008),或是局限于对生态系统服务功能价值变化的单一区划(燕乃玲和虞孝感 2003; 崔丽娟 2004; 顾梦等 2009),并没有真正实现对区域生态系统服务功能空间变化状态的反映(宗文君等 2006; 欧阳志云 2007)。总之,国内外的相关研究均未能充分

^{*} 国家自然科学基金项目(40801231)、科技部国际合作重大专项(2006DFB919201)和中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-305-2)。

^{**} 通讯作者 E-mail: zhanjy@bnu.edu.cn

收稿日期:2008-12-15 接受日期:2009-05-06

揭示区域生态系统服务功能的相对重要性,并缺乏栅格尺度空间动态区划的案例研究。

生态系统服务功能动态区划系统(system for identifying and zoning ecosystem services, SIZES)是用于开展生态系统服务功能评价的专业软件工具。该软件能够在分层输入栅格数据之后自动生成案例区生态系统服务功能区划边界,直观体现区域生态系统服务功能随时间变化的空间动态分布特征。它在拥有区域生态系统服务功能指标体系构建功能的同时,还具备2个重要功能:1)生成区域生态系统服务功能位序矩阵,提炼表征核心生态系统服务功能的主因子,在栅格尺度上揭示各种生态系统服务功能的重要性;2)在提炼表征核心生态系统服务功能主因子的基础上,在精细的栅格尺度上辨识区域生态系统服务功能一致性图斑单元,形成区域生态系统服务功能区划。

鄱阳湖湖区拥有中国最大的淡水湖泊和全球重要的保护湿地,同时也是中国城市化推进、经济发展及人口增长等因素导致湖区生态系统压力增大并引发区域生态系统服务功能退化的典型区域。本文介绍了SIZES的功能模块及其操作步骤,并选取鄱阳湖湖区开展案例研究,以为鄱阳湖湖区及其他湿地生态系统的分区管理提供参考。

1 生态系统服务功能动态区划系统

1.1 系统简介

SIZES在构建层式化区域生态系统服务功能的表征指标体系的基础上,内嵌因子分析法和空间模糊聚类法,利用离散的1 km栅格成分数据模型,在较精细的栅格尺度上测度区域生态系统服务功能的变化,构建区域生态系统服务功能位序矩阵,辨识核心生态系统服务功能并判定其动态区划边界(图1)。

1.2 系统原理

SIZES自动识别生态系统服务功能区划边界的原理体现在以下四个方面:1)利用层次分析法遴选出表征区域生态系统服务功能的可量化初级指标;2)基于因子分析法计算生态系统服务功能位序矩阵,阐明不同生态系统服务功能的相对重要程度;3)利用主分量估计的方法提炼出表征区域生态系统服务功能的高级指标,形成区域生态系统服务功能多层次指标体系;4)运用空间模糊聚类分析法实现区域生态系统服务功能的动态区划与空间辨识。



图1 生态系统服务功能动态区划系统界面

Fig. 1 User interface for System for Identifying and Zoning Ecosystem Services

1.2.1 基于层次分析的生态系统服务功能指标体系 区域生态系统服务功能的结构特征决定了其指标体系必然具有一定的层次性和等级性(王伟和陆健健,2005)。SIZES参照MA(Millennium Ecosystem Assessment, 2005)框架构建分层、分级的区域生态系统服务功能指标体系。指标层次越高,其概括性越强,越能够充分地抽象、综合区域生态系统服务功能。例如,在构建鄱阳湖湖区生态系统服务功能动态区划指标体系时,将调节功能、供给功能、文化功能和支持功能作为高层次指标,充分、有效地反映了人们从生态系统中获得的各种惠益。而低层次指标具有易量化、可测度等特点,是提炼高层次指标的基础。

低层次区域生态系统服务功能指标的选取遵循3条原则:1)指标表征数据易于获取;2)能够覆盖区域生态系统服务功能的各个方面;3)与反映区域生态系统服务功能的高一级指标相对应。综合考虑上述原则,区域生态系统的支持功能一般以净初级生产力、土壤侵蚀强度、林地面积比例和土地质量作为数据支撑;供给功能以粮食单产、到水源地距离、耕地面积比例和到矿产资源地的距离作为数据支撑;调节功能以多年平均气温、气温变化率、多年平均降水量、降水变化率和景观多样性指数作为数据支撑;文化功能以保护区面积比例、到民族景区距离、到自然风景区距离和到专题教育基地距离作为数据支撑。这些易于获得的指标形成区域生态系统服务功能空间区划指标体系的低层次指标。以低层次指标作为数据支撑,运用因子分析和主分量估计的方法,提炼出直接的、有序的、不可观测的主因子,并将其

作为区域生态系统服务功能高层次指标。

1.2.2 基于因子分析的生态系统服务功能位序矩阵 生态系统服务功能的相对重要性是区域生态系统服务功能评价的主要目标之一。SIZES 能够运用因子分析法生成生态系统服务功能位序矩阵以实现这一目标。首先 SIZES 将变量进行标准化处理,以消除量纲影响,然后,利用因子分析法产生因子载荷矩阵,每个因子载荷反映的是变量对主因子的相对重要程度,因子载荷矩阵各列的平方和表示主因子对变量的总影响,称为主因子贡献率。生态系统服务功能位序矩阵即是按照生态系统服务功能贡献率降序排列产生的矩阵,用以实现生态系统服务功能优先序列的空间标识。

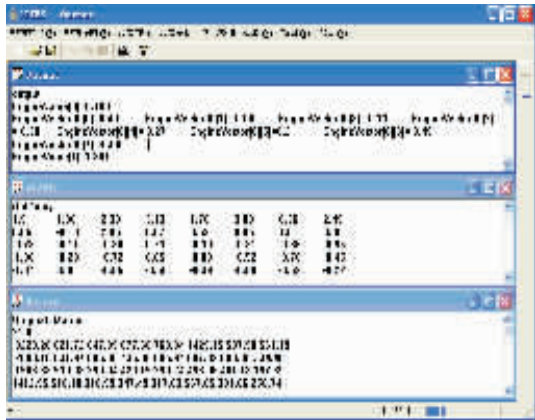
1.2.3 基于主分量估计的核心生态系统服务功能辨识 在生成生态系统服务功能位序矩阵的基础上,通过主分量估计可以进一步提取表征核心生态系统服务功能的主因子。区域核心生态系统服务功能提取的关键是利用少数几个不相关的主因子描述所有变量间的协方差结构,以再现低层次指标与高层次指标之间的定量关系。简言之,即按照一定的标准选取生态系统服务功能位序矩阵中贡献率较大的几个主因子作为表征区域核心生态系统服务功能的高层次指标。

1.2.4 基于一致性图斑单元的生态系统服务功能动态区划 生态系统服务功能动态区划即是采用空间模糊聚类分析方法,按照核心生态系统服务功能的相似程度对最小一致性图斑单元分类并形成空间连续的区划单元。SIZES 的空间模糊聚类分析利用模糊集理论处理分类问题以提高分类的精度,在处理生态领域中具有模糊特征的数据方面具有明显优势。生态系统服务功能动态区划的意义在于形成区域生态系统服务功能一致性单元,为区域生态系统管理规划提供科学支撑。生态系统服务功能动态区划的结果输出形式(图2)。

1.3 系统结构

SIZES 采用了如下设计框架:根据区域生态系统服务功能形成机制及 MA 概念框架(赵同谦等, 2004;Millennium Ecosystem Assessment 2005),利用层次分析法建立可观测的生态系统服务功能低层次指标,采用因子分析并主分量估计的方法生成生态系统服务功能位序矩阵并提取主因子作为表征区域核心生态系统服务功能的高层次指标,在此基础上,通过模糊聚类分析法迭代分析对一致性图斑单元进

报表输出方式



图形输出方式

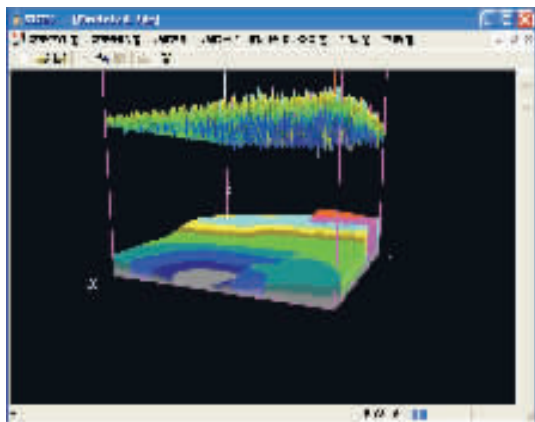


图2 生态系统服务功能动态区划系统结果输出
Fig.2 Output of System for Identifying and Zoning Ecosystem Services

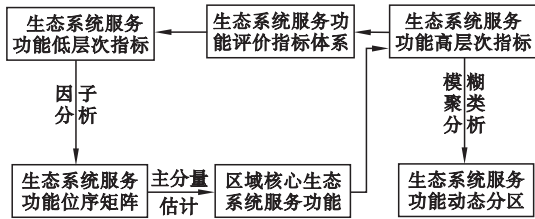


图3 生态系统服务功能动态区划系统模型
Fig.3 Modeling framework of System for Identifying and Zoning Ecosystem Services

行空间动态聚类,形成区域生态系统服务功能一致性单元(图3),最后,通过对该一致性单元的制图综合,形成生态系统服务功能区划。

2 应用实例

2.1 研究区概况

以鄱阳湖湖区为案例区来具体阐述 SIZES 的功能及操作步骤。鄱阳湖湖区位于 28°22'N—29°45' N,115°47'E—116°45'E,在行政区划上辖南昌市区、

南昌县、新建县、进贤县、九江市、永修县、德安县、星子县、都昌县、湖口县、余干县和波阳县。随着鄱阳湖湖区人口的急剧膨胀及工业化、城市化的快速发展,人们对有限的生态系统服务功能的需求持续攀升(刘士余等 2007 ;Ellis *et al.* 2007)。

2.2 数据处理

基于遥感数据解译的土地覆被数据是 SIZES 表征生态系统服务功能的基础数据之一。该数据由中国科学院资源环境科学数据中心提供,解译精度达 92.7%,信息提取方法与精度验证详见文献(刘纪远和布和敖斯尔 2000 ;战金艳等 2006)。其中,土地覆被类型根据案例区的实际情况划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地 6 种主要类型(Deng *et al.* 2008)。

基于 SIZES 的区划指标体系构建原则,遴选了涵盖自然、社会、经济等自变量的鄱阳湖湖区生态系统服务功能低层次指标并制备了相关数据。其中,土壤侵蚀数据来自中国科学院资源环境科学数据中心利用遥感数据解译获得的中国土壤侵蚀度数据库,原始数据以矢量格式存储,在利用鄱阳湖区的边界切割后,被转换成 1 km × 1 km 栅格数据;区位数据包括距水源地距离、距矿产资源地距离等,这类信息主要基于国家基础地理信息 1:250000 地形图进行重分类计算获得;气温数据来自于中国气象局;社会数据(民族景点区等)采用了离散化处理方法,最后形成社会数据栅格数据层。

采用 1 km 栅格成分数据模型,将生态系统服务功能的低层次指标综合成一个指标集,形成多个栅格数据层,并在 ARCGIS 软件环境的 GRID 模块下,形成一个栅格 Stack(邓祥征等 2008)。图 4 为净植物初级生产力($g\ C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)在 1 km × 1 km 栅格尺度上的离散化状态。

2.3 方法应用

2.3.1 核心生态系统服务功能辨识 SIZES 通过因子分析并主分量分析方法生成因子载荷矩阵并提取表征核心生态系统服务功能的主因子。因子载荷矩阵反映了各变量(低层次指标)对其归属主因子(高层次指标)的相对重要程度(图 5)。

因子分析的结果表明前 4 个主因子的累计贡献率为 61.9%,符合主因子遴选时累计贡献率达到 60% ~ 90% 的要求,前 3 个主因子的贡献率相当,分别占 20.0%、18.0% 和 14.1%。其中,第 1 个主因子中,林地面积比例、土地质量 2 个指标的因子载荷

较大,可将其解释为支持功能;在第 2 个主因子中,到民族景区距离、到自然风景区距离和到专题教育基地距离 3 个指标的因子载荷相对较大且分布相对集中,分别为 0.875、0.771 和 0.905,可将其解释为文化功能;在第 3 个主因子中,多年平均气温、气温变化率、多年平均降水量和降水变化率 4 个指标的因子载荷较大,可将其解释为调节功能;第 4 个主因子中,粮食单产、到水源地距离和耕地面积的因子载荷较大,可将其解释为供给功能。此四者即为鄱阳

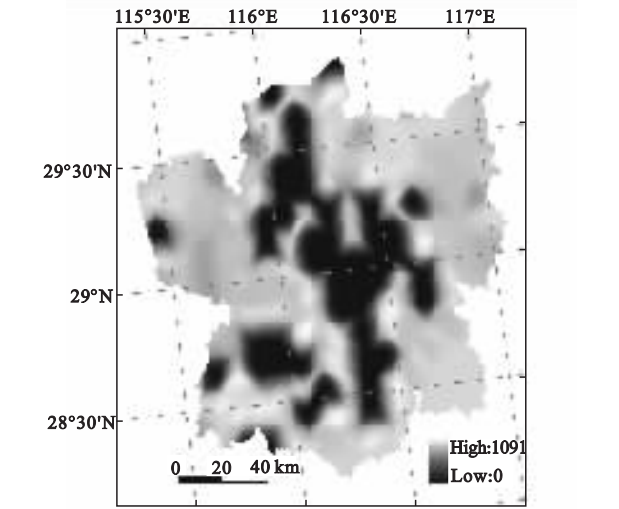


图 4 净初级生产力在 1 km × 1 km 栅格单元上的分布
Fig. 4 Spatial distribution of net primary productivity at 1 km by 1 km grid pixel

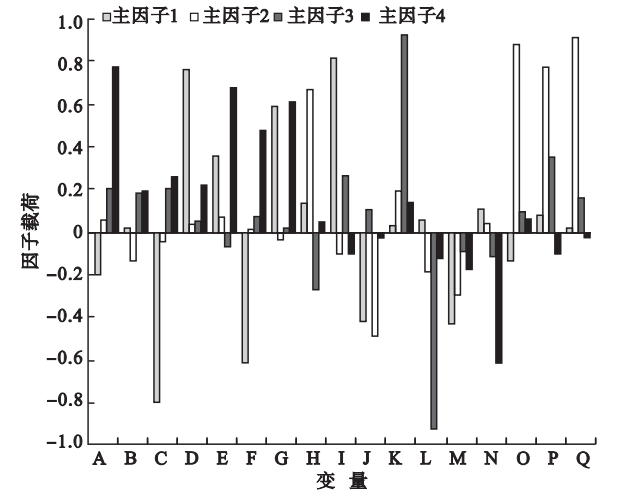


图 5 表征核心生态系统服务功能因子载荷的柱状图
Fig. 5 Histogram for loading matrix of factor analysis
A: 净初级生产力; B: 土壤侵蚀强度; C: 林地面积比例; D: 土地质量; E: 粮食单产; F: 到水源地距离; G: 耕地面积比例; H: 矿产资源丰度; I: 多年平均气温; J: 气温变化率; K: 多年平均降水量; L: 降水变化率; M: 景观多样性指数; N: 保护区面积比例; O: 到民族景区距离; P: 到自然风景区距离; Q: 到专题教育基地距离。

湖湖区核心生态系统服务功能。同时, SIZES 还将基于生态系统服务功能低层次指标栅格数据层, 计算每个栅格上核心生态系统服务的值, 实现 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 栅格上的核心生态系统服务功能辨识。

2.3.2 生态系统服务功能区划边界生成 SIZES 采用模糊聚类分析的方法, 根据鄱阳湖湖区核心生态系统服务功能的相似程度对一致性图斑单元开展空间模糊聚类分析, 将因子分析中辨识出的 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 栅格核心生态系统服务功能进行重分类与命名, 形成类型一致、生态系统服务功能水平大致相当的各类/级生态系统服务功能的图斑单元, 同时生成生态系统服务功能区划边界(图2)。在利用 SIZES 生成生态系统服务功能动态区划边界的基础上, 融合 ARCGIS 的空间制图功能, 形成了鄱阳湖湖区 10 个生态系统服务功能分区(图6)。

从图6可以看出, 鄱阳湖湖区的生态系统服务功能区划边界和行政区划边界之间存在明显差异。以波阳县为例, 该县跨越了8个生态系统服务功能分区, 南昌市、余干县和都昌县各跨越3个生态系统服务功能分区, 且3个生态系统服务功能分区的面积比例相当; 湖口县、进贤县、新建县、永修县和德安县都是以一种生态系统服务功能为主; 九江市和星子县也跨越了多个生态系统服务功能分区; 而南昌

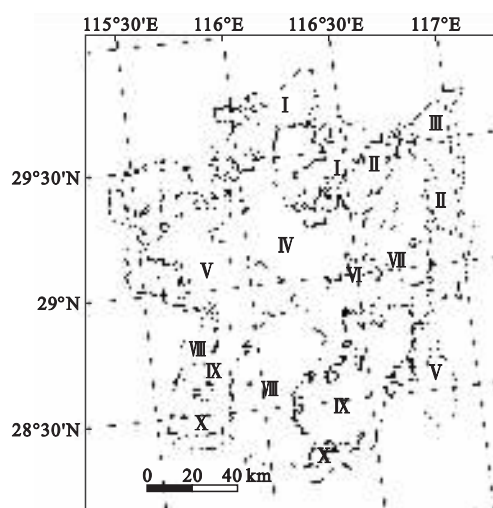


图6 鄱阳湖湖区生态系统服务功能区划

Fig. 6 Ecological zones of ecosystem services in Poyang Lake area

I 北部生态系统服务功能文化区; II 北部生态系统服务功能供给区; III 北部生态系统服务功能调节区; IV 中部生态系统服务功能调节区; V 中部生态系统服务功能供给区; VI 中部生态系统服务功能支持区; VII 中部生态系统服务功能文化区; VIII 南部生态系统服务功能文化区; IX 南部生态系统服务功能支持区; X 南部生态系统服务功能供给区。

县是唯一一个行政区划边界和生态系统服务功能区划边界吻合良好的县。因此, 各个县、市要根据各自生态系统服务功能分区的特征进行宏观管理及规划, 制定因地制宜、因时而异的调控生态系统服务功能的途径和方法。

3 结 论

生态系统服务功能动态区划系统采用 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 栅格成分数据模型融合自然、社会和经济等多源数据, 内嵌因子分析模型和空间聚类分析模型, 综合分析高时空分辨率的栅格观测单元的指标数据, 提取表征区域核心生态系统服务功能的主因子, 并在此基础上通过空间模糊聚类分析生成生态系统服务功能区划边界。生态系统服务功能动态区划系统能够为生态系统服务功能分区管理提供具有较强时空针对性的决策参考信息。

生态系统服务功能动态区划系统在鄱阳湖湖区的应用表明, 根据核心生态系统服务功能特征一致性原则, 鄱阳湖湖区可以划分为10个生态系统服务功能区划单元。此10个生态系统服务功能区划单元能够通过反映鄱阳湖湖区生态系统服务功能的时空团簇状态, 为区域生态服务功能分区管理提供决策参考信息。这种在流域尺度上进行生态系统服务功能空间聚类的方法可以在其他地区推广应用, 所得结论将为制定区域生态系统服务功能发展规划与生态系统适应性管理方面的决策提供科学依据。

生态系统服务功能动态区划系统在自动识别鄱阳湖湖区生态系统服务功能分区边界方面具有显著作用, 提供了具有较强时空针对性的信息, 但是该软件的空间制图能力还需要进一步加强。

参考文献

- 崔丽娟. 2004. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究. 生态学杂志, 23(4): 47-51.
- 邓祥征, 战金艳, 苏红波, 等. 2008. 黄淮海平原土地系统结构变化的模拟与分析. 安徽农业科学, 36(4): 1542-1546.
- 范泽孟, 岳天祥. 2007. 生态区边界智能识别模型构建分析. 地球信息科学, 9(1): 40-45.
- 傅伯杰, 陈利顶, 刘国华. 1999. 中国生态区划的目的、任务及特点. 生态学报, 19(5): 294-298.
- 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 2001. 中国生态区划方案. 生态学报, 21(1): 1-6.
- 顾 芾, 周生路, 张 红, 等. 2009. 南京市生态系统服务价值时间变化及区域差异分析. 生态学杂志, 28(3): 497-502.

- 刘纪远,布和敖斯尔. 2000. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究——基于卫星遥感数据. *第四纪研究*, **20**(3):229–239.
- 刘士余,肖青亮,蔡海生. 2007. 鄱阳湖湿地景观结构与可持续利用研究. *水土保持研究*, **14**(5):342–344.
- 欧阳志云. 2007. 中国生态功能区划. *中国勘察设计*, (3):70.
- 舒若杰,高建恩,赵建民,等. 2006. 黄土高原生态分区探讨. *干旱地区农业研究*, **24**(3):143–148.
- 王伟,陆健健. 2005. 生态系统服务功能分类与价值评估探讨. *生态学杂志*, **24**(11):1314–1316.
- 燕乃玲,虞孝感. 2003. 我国生态功能区划的目标、原则与体系. *长江流域资源与环境*, **12**(6):579–585.
- 战金艳,邓祥征,赵涛. 2006. 甘肃省庆阳市景观演替情景分析. *地理与地理信息科学*, **22**(3):101–105.
- 赵同谦,欧阳志云,郑华,等. 2004. 草地生态系统服务功能分析及其评价指标体系. *生态学杂志*, **23**(6):155–160.
- 宗文君,蒋德明,阿拉木萨. 2006. 生态系统服务价值评估的研究进展. *生态学杂志*, **25**(2):212–217.
- Dehring CA, Lind MS. 2007. Residential land-use controls and land values: Zoning and covenant interactions. *Land Economics*, **83**:445–457.
- Deng XZ, Su HB, Zhan JY. 2008. Integration of multiple data sources to simulate the dynamics of land systems. *Sensors*, **8**:620–634.
- Ellis MK, Raso G, Li YS, et al. 2007. Familial aggregation of human susceptibility to co- and multiple helminth infections in a population from the Poyang Lake region, China. *International Journal of Parasitology*, **37**:1153–1161.
- Fang Q, Zhang L, Hong HS, et al. 2008. Ecological function zoning for environmental planning at different levels. *Environment, Development and Sustainability*, **10**:41–49.
- Kara T, Guler M. 2007. Agro-ecological zoning by GIS: A case study of the Bafra and Carsamba plains in Turkey. *Asian Journal of Chemistry*, **19**:2277–2284.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends, Volume 1. Washing DC: Island Press.
- Sabatini MD, Verdiell A, Rodríguez RM, et al. 2007. A quantitative method for zoning of protected areas and its spatial ecological implications. *Journal of Environmental Management*, **83**:198–206.
- Shitilov VK, Vykhristyuk LA, Pautova VN, et al. 2007. Comprehensive ecological zoning of the Kuibyshev Reservoir. *Water Resources*, **34**:450–458.
- Zhou J, McMillen DP, John FM. 2008. Land values and the 1957 Comprehensive Amendment to the Chicago Zoning Ordinance. *Urban Studies*, **45**:1647–1661.
- Zollner PA, Gustafson EJ, He HS, et al. 2005. Modeling the influence of dynamic zoning of forest harvesting on ecological succession in a northern hardwoods landscape. *Environmental Management*, **35**:410–425.

作者简介 史娜娜,女,1983年生,硕士研究生。主要从事生态系统评价等方面的研究。E-mail:shinn.dls@gmail.com
责任编辑 刘丽娟
