

基于生态系统服务供需关系的广西县域 国土生态修复空间分区

谢余初^{1,2,3}, 张素欣^{1,2}, 林冰^{1,2}, 赵银军^{1,2}, 胡宝清^{1,2}

- (1. 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001;
2. 南宁师范大学广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001;
3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100)

摘要: 国土生态修复是我国土地整治战略发展的需求, 其空间分区与管控是实施国土整治与生态修复差别化建设的前提条件。以广西各县市为研究单元, 在测算和分析生态系统服务供给量和需求量基础上, 利用象限匹配法、双变量局部空间自相关和供需协调度来定量分析生态系统服务供需匹配关系、空间聚集程度和协调关联性, 进而探讨和划分广西国土生态修复的空间分区及其管控措施与建议。研究表明: (1) 广西各县市生态系统服务供给和需求差异明显。环绕广西的四周山林地和重点生态功能区生态系统服务供给量较高, 大中城市区则较低。生态系统服务需求量自东南向西北逐渐减少。(2) 广西生态系统服务供需空间匹配呈现高供高需型、低供高需型、低供低需型、高供低需型四种类型, 供需局部空间自相关以高一低或低一高的空间聚集为主, 且生态系统服务供需协调度平均值为0.531, 处于一般均衡。(3) 结合生态系统服务供需匹配四类特征和广西地理环境条件, 将广西各县域划分为10个分区, 并针对各分区提出差异化整治措施和建议。总体上, 生态系统服务高供高需型的区域应以保育为主、培育为辅, 防止过度开发; 高供低需型的区域以保护为主, 提高管理水平; 低供高需型的区域应以综合改良为主, 提高土地效益; 低供低需型的区域应以国土生态重构或重建为主, 侧重恢复生态系统。

关键词: 生态系统服务; 供需关系; 国土生态修复; 空间分区; 广西

随着我国社会经济发展和人口不断增长, 人们对土地需求也不断增加, 但由于土地资源的有限性和空间性严重制约着土地的供给和开发^[1-3], 致使区域人地矛盾和资源环境问题日益突出^[2,3]。为此, 中国在20世纪90年代就提出土地整治, 对未利用、低效或闲置、损毁(污染)和退化土地进行综合整治与修复^[3-5], 包括土地深度利用与再开发、污染或退化土地的生态修复、基本农田建设与保护、撂荒土地复垦与整理、土地利用结构调整与规划等活动^[3-5]。近几年来更是强调提高土地利用效益、永续利用、改善环境与景观的国土生态修复^[4-6], 重视在国土生态修复空间分区基础上因地制宜地实施差别化的措施和对策^[7]。

国土空间分区是开展国土整治与生态修复具体工程项目的空间指导与前提基础^[6,7], 目前主要是根据修复目的, 结合地形、土地利用、气候、水文、土壤、植被及区位等各个要素或评价指标及其体系进行国土整治或生态修复的空间分区综合研究^[7-9], 较少从国

收稿日期: 2019-08-11; 修订日期: 2019-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761039, 41661085); 广西自然科学基金项目(2016GXNSFBA380047, 2018JJA150132)

作者简介: 谢余初(1983-), 男, 广西南宁人, 博士, 讲师, 主要从事国土资源管理与GIS应用。

E-mail: xieych09@lzu.edu.cn

土生态修复的目的——生态系统服务提升与供需平衡的角度开展案例分析^[9,10]。生态系统服务及其供需权衡协同是人类活动与生态系统相互作用响应的结果,其生态系统空间结构—格局—过程—功能—人类惠益(服务)相互关联作用的理论能为国土生态修复提供理论支撑^[11]。为此,随着中国国土综合整治与生态修复的发展和生态系统服务研究的不断深入^[12-14],越来越多的学者尝试从生态系统服务的角度来探讨国土生态修复或整治分区^[14-16]。如刘春芳等^[15]在分析评估生态系统服务供给功能(食物供给、生境质量、碳固持和土壤保持)基础上,结合各项生态系统供给服务障碍因素,讨论了甘肃省榆中县农田整治分区与调控。田美荣等^[16]以生态系统服务功能和生态系统退化程度为指标,将巴林右旗土地生态修复分区划分为7个二级区29个生态区。管青春等^[17]通过分析生态系统服务供需匹配度和协调度,探讨和划分了河北省曲周县的农业生态管理空间分区并提出各分区的管理措施。可见,从生态系统服务角度开展区域国土生态修复的空间分区是可行^[17]。但这些研究考虑更多的是生态系统服务的供给量,较少从生态系统服务供需关系的角度开展案例分析^[9,10]。同时,在国土生态修复规划体系中,省(自治区)级国土生态修复的分区规划是国家土地整治任务指标的具体分解,也是各县乡部署国土生态修复工程的理论依据和把控方向^[18]。因此,有必要基于生态系统服务供需特征与空间匹配关系开展省(自治区)级国土生态修复的空间分区的案例研究。

广西是我国喀斯特石漠化治理核心区之一,也是南方人工桉树林规模种植集中区,区内生态环境脆弱、土地利用和生态系统服务区域差异性大、土地生态系统退化严重^[19],故本文拟以广西壮族自治区为研究区,通过测算和分析各县市生态系统服务供给和需求状况^[10]、空间分异特征、匹配类型及关联程度,对广西国土生态修复的空间分区进行讨论与划分,旨在为广西国土生态修复的规划和差异化管理提供基础理论依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

广西壮族自治区(简称广西)地处中国地势第二阶梯的云贵高原东南缘,地形复杂多样,地势大致呈西北向东南倾斜,四周为山地和高原环绕,山岭连绵、岭谷相间、交错纵横,中部和南部多为丘陵土坡和盆地,是典型的山岭丘陵盆地地貌^[19,20]。广西属于亚热带季风气候区,气候温暖、雨水丰沛,夏季日照充足、高温多雨、雨热同期,冬季温凉少雨,年平均气温21.1℃,年平均降水量1600mm左右。同时,植物种类繁多,森林覆盖率高。总体上看,广西拥有峰林、山地、丘陵、洼地、盆地、平原、河谷、石山、水库湖泊等多种地貌景观,山多地少、喀斯特山区面积广泛,石漠化问题突出^[19,20]。

1.2 研究思路与方法

1.2.1 国土生态修复与生态系统服务

国土生态修复是在区域或国家宏观尺度上,通过国土要素及其空间结构的调整与优化、生态功能修复与提升或者生态系统自我调节与恢复,实现生态系统及其服务的良性健康发展与区域景观生态安全^[5,11]。国土生态修复和生态系统服务两者密切相关、相互影响^[12,13](图1)。国土生态修复活动通过保护、改良、引导、优化、重塑等方式开展国土空间的生态保育、培育、恢复、治理或重建,不仅改变了生态系统的要素(如植被、土壤、水分、小气候等)、结构及土地利用组合方式与空间格局,而且影响着区域生态系统服务损益及其价值供给的可持续性^[13,14]。生态系统服务损益与供需平衡变化必然会引起不

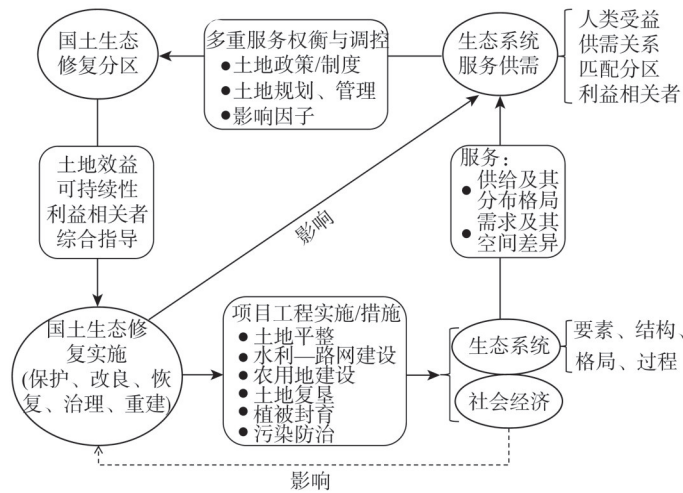


图1 国土生态修复与生态系统服务关联框架

Fig. 1 Relationship between land ecological consolidation and ecosystem services

同利益相关者在土地管理上进行权衡评估、调整与管控^[21]，即人们在获得各项生态系统服务过程中，根据社会需求、土地整治修复目标和当前生态系统服务供需状况，对生态系统服务进行权衡和优化，进而潜移默化地影响着国土生态修复的方向、目标、规划设计和分区布局^[9,10,14]。可见，当前生态系统服务空间分异特征、供需匹配及其分区，是构建区域国土生态修复模式与途径的基础^[8-11,14]，也是土地资源可持续利用的前提条件。

在当前山水林田湖草生命共同体的生态文明建设理念下^[11]，从生态系统服务角度开展国土生态修复空间分区的方法路径（图2），国土生态修复过程应在系统工程学、景观生态学、恢复生态学和入地关系理论指导下，分析和清晰生态系统服务空间分异特征、供需匹配及其分区^[11,22,23]，明确国土空间生态修复与生态系统服务之间相互作用机制，进而提出基于生态系统服务的国土生态修复模式及实施策略与措施，构建国土空间生态安全，实现生态系统服务提升和区域可持续发展^[5,11]。首先，要了解区域环境本底信息，定

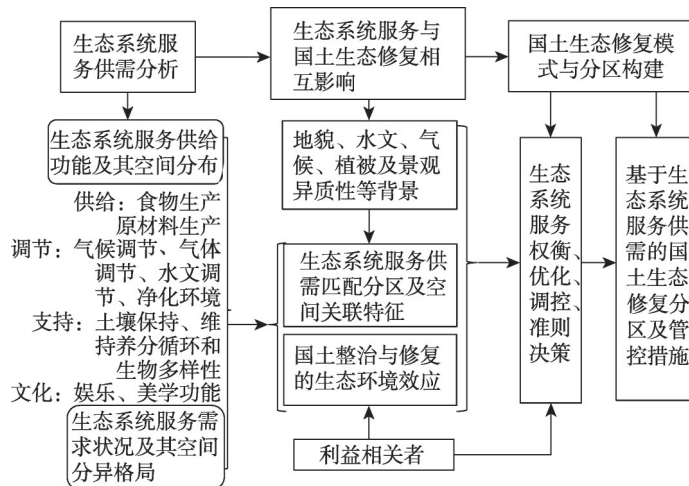


图2 基于生态系统服务的国土生态修复研究路径

Fig. 2 Research path of land ecological consolidation

量分析和评价生态系统服务供给和需求状况,明晰其空间格局与分异特征^[9]。然后,以空间化的视角分析和识别生态系统服务供需匹配与空间关联特征,并分析和探讨其影响因素与作用机制。最后,结合研究区地形、气候、植被、土壤等地理特征差异,根据国土生态修复的时空维度与修复目标、内容和手段,分析和确定国土生态修复主导方向、分区过程及管控措施^[17,24]。其中,生态系统服务供给是指在一定的时间和区域范围内生态系统为人类和社会发展提供的相关产品和服务的能力^[24-26],是国土生态修复及其分区的目标,也是保障区域社会发展的生态基础。生态系统服务需求是指人类社会耗费使用或者希望获得各种服务^[26,27],是社会发展和土地整治的潜在动力和方向。但在国土生态修复过程中,人们对生态系统服务的需求往往未能得到有效计算^[28],且生态系统服务供需在区域空间上存在明显差异性和错位^[27,28]。

1.2.2 生态系统服务供需测算

生态系统服务供给测算主要是结合 Costanza 的生态系统服务价值理论和谢高地等^[29-31]提出的中国陆地生态系统服务价值当量因子表及标准生态系统生态服务经济价值计算方法^[30-32],并利用广西生物量与全国生物量的比值修订生态系统服务当量因子系数表来消除采用全国参数表征区域特征的误差^[30-32]。即在利用 2015 年广西壮族自治区单位面积粮食产量和全国单位面积粮食产量的比值来修订单位面积农田生态系统服务当量经济价值(约为 3148.5 元/hm²)基础上,结合各种土地利用类型面积及其服务价值,计算广西壮族自治区不同县域生态系统服务总价值 [式 (1)]^[29-31]。

综合考虑影响生态系统服务变化的驱动因子及各数据的可获得性^[26,27],分别选取人口密度、土地利用综合程度和地均 GDP 三个指标^[26]来反映生态系统服务需求的数量(广度)、消耗强度和潜在深度,借助统计学中取自然对数的方法综合表征区域生态系统服务总需求 [式 (2)]^[26,27]。

$$ESV = \sum A_k \times VC_k \quad (1)$$

$$X = \lg(X_1) + \lg(X_2) + \lg(X_3) \quad (2)$$

式中: ESV 为生态系统服务价值(元); A_k 为第 k 种生态系统类型的面积(hm²); VC_k 为第 k 种生态系统类型的单位面积生态系统服务价值(元/hm²); X 代表评价单元生态系统服务需求; X_1 、 X_2 、 X_3 分别代表评价单元的土地利用综合程度、人口密度、地均 GDP。

1.2.3 生态系统服务供需匹配分析

在计算获得生态系统服务供给量和需求量后利用方差进行 z-score 标准化^[10,26,27],并将标准化后的结果通过划分象限进行供需匹配分析,以 x 轴表示生态系统服务标准化的供给量、 y 轴表示标准化的需求量^[10,27],划分出四种供需匹配状态象限:高供给—高需求(I象限)、低供给—高需求(II象限)、低供给—低需求(III象限)、高供给—低需求(IV象限)^[10,26,27]。然后,利用双变量局部空间自相关模型(LISA)和生态系统服务供需协调度(K)^[33-34]分析和探讨区域生态系统服务供需空间聚集程度、匹配特征及协调关联性^[17,33]。在此基础上,结合广西地理环境条件和生态功能区划,利用 GIS 空间分析技术讨论和划分广西土地生态修复空间分区^[35]。

$$LISA_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 / n}} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (3)$$

$$K = \sqrt{C \times (\alpha S_{供} + \beta D_{需})} \quad (4)$$

$$C = \frac{S_{供} \times D_{需}}{\sqrt{\prod (S_{供} + D_{需})/2}} \quad (5)$$

式中： $LISA_{ij}$ 为双变量局部空间自相关指数； w_{ij} 为空间权重矩阵； i 表示第 i 个单元县； j 表示毗邻的第 j 个单元县； x_i 和 x_j 是变量 x 在相邻配对空间单元（或栅格细胞）的取值（属性）； \bar{x} 为属性值的平均值； n 为广西壮族自治区各县市单元的总数； D 是协调度指数； C 是耦合度； $S_{供}$ 和 $D_{需}$ 分布代表生态系统服务供给和需求； α 和 β 为系数。

1.3 数据来源

土地利用数据主要通过 Landsat OLI 8 遥感影像解译获取，影像来源于国家地球系统科学数据共享平台。在参考全国土地利用数据分类标准基础上，利用 ENVI 5.3 软件解译和提取广西壮族自治区耕地（水田、旱地等）、林地（含有林地、疏林地、灌木丛等）、草地（包括天然草地草甸和人工草地等）、水域（包括湖泊、水库、河流、坑塘、滩涂等）、建设用地（主要是城镇、农村居民点、交通用地和工矿用地等）和未利用地（主要是裸岩、裸地、沙地等）等6种土地利用类型^[36]。同时，采用随机抽样统计验证法，结合野外实地调查、土地变更数据库、Google 高清晰地图进行精度检验，影像解译整体精度约为82%，满足精度要求^[27,35]。统计资料数据主要来自《广西壮族自治区统计年鉴》《广西农村统计年鉴》《中国统计年鉴》以及各个地级市的统计年鉴等。

2 结果分析

2.1 广西生态系统服务供给空间格局分析

广西生态系统服务以调节服务为主，支持服务次之。2015年广西生态系统调节服务价值量约90.84亿元（占68.48%），其中水文调节服务最大，气候调节服务次之。支持服务价值量约28.86亿元（占21.76%），主要是土壤保持服务和维护生物多样性服务。在空间上，生态系统调节服务和支持服务分布格局相似，主要集中在四个片区：广西东部的梧州和贺州市的各县区，南部的上思县、防城区、横县、钦州和博白县，广西西部的田林县、隆林县、右江区、天峨县、环江县、大化县等，北部的龙胜县、融安县、融水县、灵川县、全州县等。供给服务（主要是食物供给和原材料供给服务）和文化服务（景观美学服务）相对较少，两者的价值量分别占5.40%和4.36%。空间分布上，广西生态系统供给服务主要分布在农业种植大县或果园、茶园、人工林木面积规模较大的县市，如广西中南部的灵山县、宾阳县、武宣县、兴宾区、合浦县和贵港市、钦州市、桂林市、贺州市等县市。生态系统文化服务则主要集中在桂林市、贺州市、玉林市、河池市和百色市等旅游资源丰富或乡村旅游较发达的区域。总体上，2015年广西生态系统服务供给量存在明显的空间格局差异，生态系统服务价值供给量较高的区域主要是森林覆盖较高县区，其生态系统服务价值都超过61882元/hm²（如昭平县），大致分布在四个区域：一是广西北部桂林市和三江县、融安县、融水县等，二是广西西部的隆林县、田林县、天峨县、乐业县、右江区、大化县、巴马县等地区，三是昭平县、八步区、苍梧县、金秀县、蒙山县、藤县、岑溪市、容县等广西东部地区，四是上思县、防城区、宁明县、横县、博白县、浦北县等南部地区（图3）。生态系统服务供给低值区主要分布在城区（如柳州市区、北海市区）和桂中南平原缓丘地区（图3），不足47367元/hm²，最

低是北海市区仅为 28309 元/hm²，总量最少的是合山市（26.3 亿元）。

2.2 广西生态系统服务需求分析

由图 4 可知，广西人口密度和地均 GDP 空间分布差异明显，东南部的县区较高，西北山区相对较低。其中，柳州市区人口密度和地均 GDP 最高，分别为 2450 人/km² 和 16604 万元/km²；百色和河池两市人口密度较低（平均仅为 102 人/km²），且百色市西林县地均 GDP 最低值（79 万元/km²）。其次，广西土地开发利用程度中等，平均土地利用综合程度指数约为 229，土地开发利用程度较高的地区主要集中在广西中部、南部地区，以北海市区最高，其土地利用综合程度指数约为 306，建设用地开发利用程度（所占比例）也超过 21%。整体上，根据各县域人口密度、地均 GDP 和土地利用综合程度情况计算获得生态系统服务总需求，发现生态系服务需求高值区主要集中在工农业相对发达的广西中部和东南部地区，尤其是各城市区，例如柳州市区、桂林市区、北海市区、玉林市区和南宁市区等。而广西西北部山区各县市的生态系统服务需求相对较低，均低于 16（图 4）。

2.3 生态系统服务供需匹配关联分析

基于象限分布的生态系统服务供需空间匹配格局如图 5 所示，广西生态系统服务供需匹配关系存在一定的区域差异性，大致可分为四种匹配类型：高供给—高需求的空间匹配型（高高型 I，15 个县市）、低供给—高需求的空间错位型（低高型 II，28 个县市）、低供给—低需求的空间匹配型（低低型 III，22 个县市）、高供给—低需求的错位型（高低型 IV，29 个县市）（图 5）。从生态系统服务供给和需求空间关联性上看，皮尔逊相关系数分析广西生态系统服务供需相关性显示，生态系统供需服务总体呈现负相关。同时，在进行生态系统服务供需双变量局部空间自相关分析时，其 Moran's *I* 指数值为 -0.247，并在 95% 的置信度下大多数县市单元表现为非显著性（69 个县市），即大多数县区生态系统服务供需无明显的聚合现象（图 6）。其中表现为高高聚集型的是贵港市区、横县、钦州市和武鸣县等 4 个县市，低低聚集型的是凌云县、巴马县、凤山县等 3 个县，高低聚集型的是融水、乐业、田林、天峨、宜州、隆林等 6 个县市，低高聚集

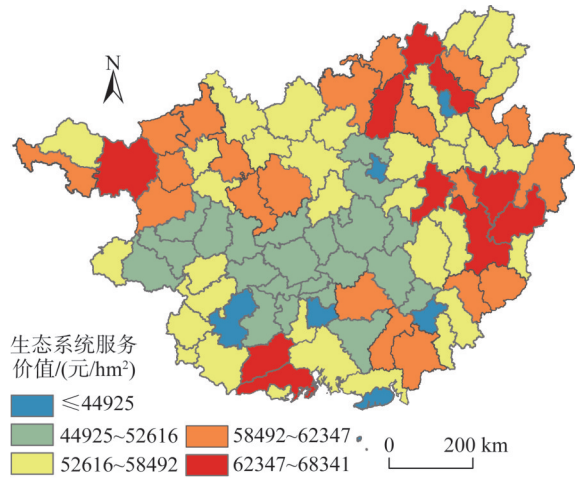


图 3 广西各县生态系统服务供给价值量

Fig. 3 Ecosystem services supply at county level in Guangxi

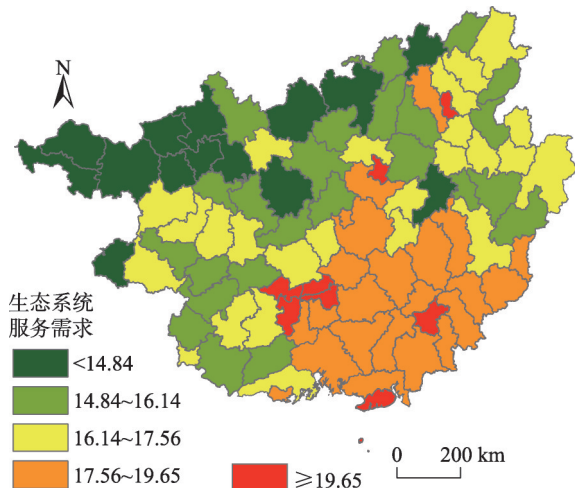


图 4 广西各县生态系统服务需求分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecosystem service demand at county level

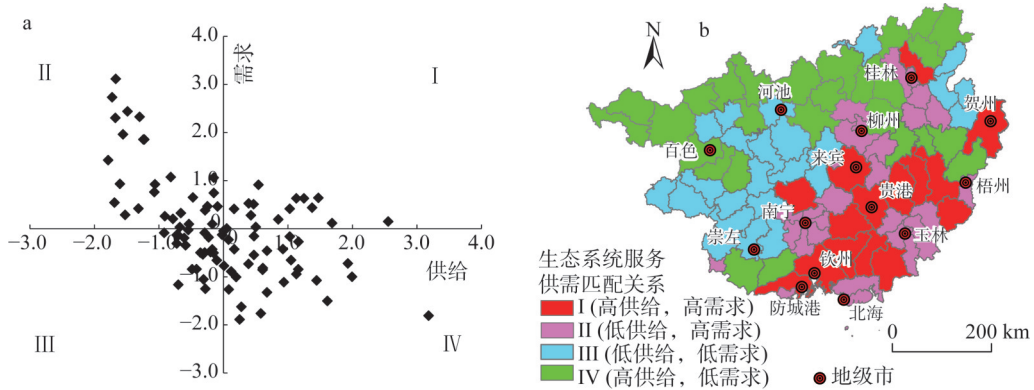


图5 广西生态系统服务供给与需求分区及其空间分布

Fig. 5 Zones and spatial pattern of ecological services supply and demands at the county level in Guangxi

型的是南市区、宾阳县、玉州区、兴业县、陆川县、北流市、容县等7个县市，表明生态系统服务供给高的区域，其需求量往往较小，各县市生态系统服务供需匹配空间自相关以高一低或低一高的空间聚集为主（图6）。

按自然断点法将生态系统服务供需协调度划分为三大类7小类，即重度失调（0~0.045）、中度失调（0.045~0.383）、轻度失调（0.383~0.486）、基本平衡（0.486~0.539）、初级协调（0.539~0.592）、中级协调（0.592~0.663）、高度协调（0.663~0.775）。2015年广西生态系统服务供需协调度平均值为0.531（基本平衡），表明广西生态系统服务实际供给与人类需求关系基本良好，生态系统服务可持续。在空间分布上，生态系统服务供需协调度整体呈现桂西北地区较低、东南地区较高（图7）。其中，生态系统服务供需协调度较好的区域（>0.539），面积约占57.21%，集中分布在桂林—柳州—南宁—凭祥一线的广西中东部地区，且以郁江盆地、贺州盆地、来宾平原等工农业较好的盆地缓丘区最高，反映出区域生态系统服务供需关系之间处于良性过程、可持续能力较好。生态系统服务供需协调度基本平衡的区域（0.486~0.539），面积占19.43%，主要是上林县、隆安县、右江区、马山县、武宣县、象州县、罗城县、阳朔县等20个县市。生态系统服务供需协调度较低的区域（<0.486），面积约占23.36%，主要分布在人口密集、社会经济发展好的城市区（需求量远远高于供给量）或者地广人稀的山林区和生态功能区（需求量远低于供给量），如桂林市、柳州市、北海市、合山市、南宁市等城市和田林县、金秀县等县域。

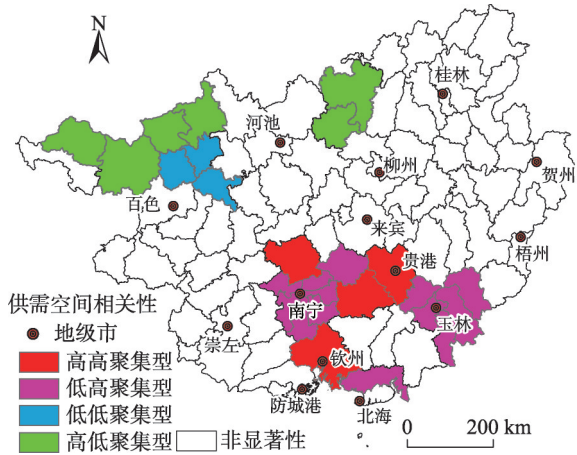


图6 广西生态系统服务供需双变量局部空间自相关

Fig. 6 Local spatial agglomeration of ecosystem service supply of Guangxi

2.4 广西国土生态修复空间分区与管控

根据广西生态系统服务供给和需求的空間分布特征和匹配类型、供需协调程度状

况，结合广西地理环境与气候差异性、社会经济发展和《广西壮族自治区生态功能区划》，按照区域发展相关理论、主导型和综合性原则，以县级行政区划为基本单位，从土地整治与生态修复管控的角度将广西划分为4个大区10个国土生态修复分区：高高型Ⅰ1和Ⅰ2，低高型Ⅱ1和Ⅱ2，低低型Ⅲ1、Ⅲ2和Ⅲ3，高低型Ⅳ1、Ⅳ2和Ⅳ3，同时针对不同分区提出差异化管控措施（图8）。

（1）桂中—桂东盆地平原区（Ⅰ1）和沿海台地丘陵区（Ⅰ2）：这两个区域生态系统服务都是“高供给—高需求”的空间匹配格局，其供需协调度均表现为高度协调和中度协调。区内地理条件较好，水、土、光、热等自然条件优越，生态本底较好、森林覆盖率高、河流水库面积大；同时人口密度较大、农业生产活动频繁、农林产业发达、社会发展经济水平 and 城镇化建设较高或中等，是生态系统服务高供给区（尤其是供给服务和调节服务），也是生态系统服务高需求区（平均生态系统服务需求量为17.71）。因此，该区域主要是保护和维持好当前生态系统及其服务供需状况。一方面应积极发挥良好的经济与生态优势，重视基本农地保护和高标准农田建设，加强农业生产功能和农地产出效益，如建设以蔗糖、亚热带林果和用材林为主的桂南丘陵农林生态功能区，以水稻—蔗糖—蔬菜—特色水果为核心的郁江—浔江平原农业生态功能区等。另一方面，不断完善水利、路网等基础设施，重视水库建设与流域管理；加快土地平整与综合整治，优化土地利用结构、增加农林用地面积，同时保护生境和改善生态环境。

（2）桂中—桂南工农业发达区（Ⅱ1）：区域内生态系统服务呈现“低供给—高需求”空间格局，主要分布在地势平坦、水土条件好、工农业发达、人口稠密的县区，是广西重点开发区域。区内自然资源相对较少，生态系统服务供给能力难以满足自身需求，生态系统服务供需关系紧张。该区国土生态修复过程要侧重生态系统服务改良，提高低值地类的利用效益。一方面合理统筹城乡建设用地，开展农村重构和土地整理^[37]。另一方面，切实保护和维持好基本农田，改善低效耕地，发展现代化农业与乡村旅游。

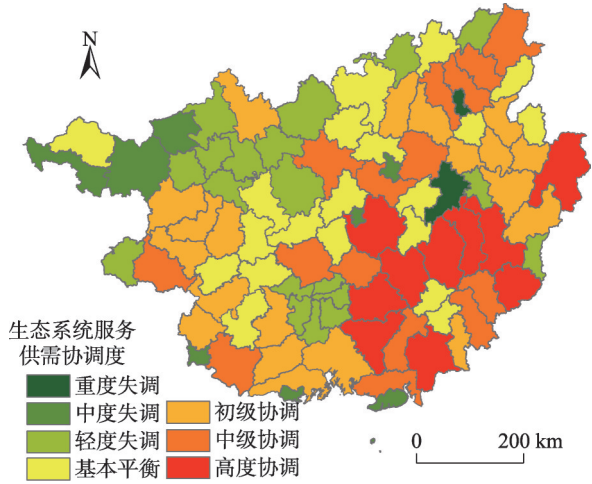


图7 广西生态系统服务供需协调度空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of ecosystem service supply and demands coordination degree of Guangxi

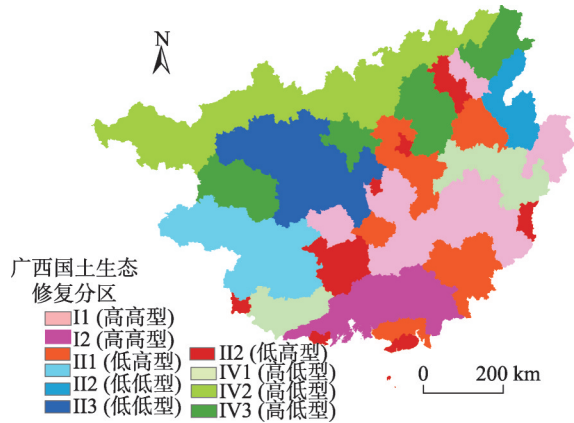


图8 基于生态系统服务供需的广西国土生态修复分区
Fig. 8 Land ecological remediation zoning based on ecosystem service supply and demands

(3) 城市辖区(Ⅱ2): 区域内生态系统服务呈现“低供给—高需求”空间格局, 主要分布在南宁市区、北海市区、桂林市区、柳州市区、梧州市区、凭祥市、合山市、东兴市等市区。区域内人口多、人类活动频繁、土地利用程度和城镇化水平较高, 生态系统服务供给远远满足不了人们的需求, 供需协调度呈现失调状况, 人地矛盾突出。因此, 该区应以生态改良为主, 重视生态修复及生态系统服务功能提升, 应坚持节约用地和集约发展, 在城区不断完善城市绿色基础设施、廊道景观, 增加公园与休闲绿地面积, 提高植被覆盖率^[37], 扩大生态用地空间(如休闲绿地、公园), 综合权衡生态文明建设与经济发展。

(4) 桂西南喀斯特山地丘陵区(Ⅲ1): 主要分布在崇左和百色两市内, 区域内水、土、光、热等自然条件优越, 拥有弄岗国家级自然保护区和老虎跳、西大明山、下雷、恩城、龙虎山、古龙山等多个自然保护区^[37], 但农业垦殖、开矿、林木开发等人类生产生活活动频繁。生态系统服务在空间呈现低供给—低需求格局, 其供需协调度以轻度协调和基本平衡为主。因此, 生态修复过程应以改良或重构生态系统服务为主, 提升生态系统服务供给, 促使区域发展成为南亚热带农林畜牧产业重要区。因此, 该区发展措施, 一方面严格实施封山育林和退耕还林, 推广畜牧圈养方式, 加快水土保持林和水源涵养林等生态公益林的建设与恢复, 加强石漠化综合治理与干旱等自然灾害的防控^[37]。另一方面, 加强自然保护区建设和管护, 构建生态廊道、保障生境连通性, 保护自然生态系统与重要物种栖息地^[37], 防治外来物种入侵与河道藻化。

(5) 桂东北岩溶孤峰谷地区(Ⅲ2): 分布在广西东北部喀斯特谷地残丘的土岭石山带, 包括有恭城县、灌阳县、富川县、钟山县(图7)。区内自然资源有限, 农业生产活动较强, 经济果木林较多, 产业结构优化和城镇化水平相对不高, 经济发展较缓慢, 属于生态系统服务低供给—低需求类型, 其供需协调度处于轻度协调和基本平衡水平。今后, 该区应侧重于生态改良或重构, 一是应加强自然植被恢复, 提高森林覆盖率, 保护生态系统的完整性。二是开展坡耕地水土流失治理、滑坡泥石流灾害防治、封山育林和土地整治工程^[37]。三是努力调整该地区的产业结构与生产布局, 着重发展康养产业、生态旅游、壮族和瑶族民族保健与医药文化产业, 因地制宜适度开发后备耕地资源, 发展绿色食品^[37]。

(6) 桂西北滇黔桂石漠化生态重建区(Ⅲ3): 分布在巴马县、凤山县、东兰县、金城江区西南部、大化县、都安县西北部和西南部、马山县东北部和西部、上林县西北部等区域(图5), 是广西喀斯特石漠化核心区和连片集中贫困山区, 石漠化面积大, 贫困深度高, 属于生态系统服务低供给—低需求类型, 其供需协调度以失调为主, 区域生态系统服务供给能力满足不了地方需求。因此, 在国土生态修复中, 应侧重于加强基质生态修复与生态重建。一是全面实施石漠化综合治理^[37], 通过封山育林、天保林工程、退耕还林还草工程、坡改梯等工程治理、农村厨灶革命和能源建设、生态移民以及改变耕作方式和畜牧圈养方式等措施, 恢复乔木灌草等自然植被, 促进生态功能的修复。二是实施乡村土地整治工程、易地生态移民搬迁工程等, 促进区域内村屯结构重构、脱贫致富与地方经济发展。三是加强生态保护的宣传和教育。利用科普基地、高校、科研院所和多媒体等采用多种手段和方式积极普及生态环境保护教育, 宣传广西青山绿水金不换的理念, 调动当地群众参与环境保护与监督管理。

(7) 桂东和桂西南的中低土山林区(IV1)。生态系统服务整体呈现“高供给—低需求”的空间匹配格局,主要分布在宁明县和上思、昭平县、蒙山县、苍梧县、金秀县等,是十万大山、桂江中上游山地重要林区和大瑶山自然保护区。由于区域内林区和保护区较多,生态系统服务供给量较高,但部分县区人类活动频繁,生态系统服务需求量大。未来区内发展措施应以保育生态系统服务为主。一是加强保护天然林和水源涵养林、继续恢复自然植被和封山育林、退耕还林还草等,努力降低开矿、林木采伐等人类活动对自然生态系统的各种破坏和干扰。二是在农村广泛开展农村生态能源建设、严禁陡坡垦荒和过度放牧,并防范和控制人工桉树林面积的扩大。三是合理开发旅游资源和动植物资源,积极发展生态旅游和经济林果绿色食品产业。

(8) 桂西北—桂北喀斯特峰丛洼地区(IV2):生态系统服务呈现“高供给—低需求”的匹配状态,各县域生态系统服务供需协调多为中度或轻度失调,少数为基本平衡。该区域生态环境本底较好,植被覆盖率高,是广西重要的水源涵养地和生物多样性重要保护区,也是西江流域上中游地区重要的生态屏障^[37]。同时区内人口密度和城镇化率较低,生态系统服务需求量少。因此,该区域应以保育和维护生态系统服务功能为主,加强水源涵养林的保护和恢复、森林自然保护区建设和管理,构建生物廊道加强生境连通性^[37],提高森林质量,防止区域大规模开发和石漠化。

(9) 喀斯特河谷平原与谷地区(IV3):生态系统服务整体呈现“高供给—低需求”的空间匹配格局,各县域生态系统服务供需耦合趋向于中度和轻度协调。该区域主要分布在广西西南部的右江河谷和湘桂走廊的桂北喀斯特谷地—缓丘—河谷平原区,是广西农林产品重要供给区和水土保持重点区。该区域国土生态修复过程应以生态系统服务培育为主,综合保护生态系统服务高值地类,提升投入产出效益,同时又注意生态环境保护^[17]。一方面,合理开发和综合利用区域旅游资源、动植物资源、水力资源,重点发展生态旅游、乡村旅游、亚热带特色林果食品、有机食品加工等生态产业^[37]。另一方面,开展废弃矿山、采石场等工矿用地治理与管理,以及水土流失和石漠化的防治工程等。

3 结论

广西生态系统服务供给和需求空间分布格局差异性明显。生态系统服务供给较高的区域主要是广西四周山林地和自然保护区,较低的区域是广西中部和南部的盆地缓丘区、大中城市区。生态系统服务需求则呈现自东南向西北逐渐递减趋势。广西生态系统服务供需在空间上可分为高高型、低高型、低低型和高低型四种匹配类型,且供需局部空间自相关以高一低或低一高的空间聚集为主,供需关系呈现负相关。2015年广西生态系统服务供需协调度平均值为0.531,处于一般均衡,并呈现桂西北地区较低、东南地区较高的分布格局。

以生态系统服务供需及其空间特征为基础,结合局部空间自相关、供需协调度和广西地理环境特征,将各县划分为四大类的10个分区,并针对各国土生态修复分区提出差异化的管理措施。总体上,生态系统服务高供高需型区域应以保育为主、培育为辅,注重保护;低供高需型区域应以综合改良为主,改善生态环境、提高土地效益;低供低需型区域应以国土生态整治、修复和重构为主,恢复生态系统;高供低需型区域应以综合保护为主,提升投产效益和管理水平。

致谢: 感谢林思妍、潘巍灵、曾丽萍等在数据处理与文字校对过程中给予的帮助!

参考文献(References):

- [1] LONG H L. Land consolidation: An indispensable way of spatial restructuring in rural China. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 211-225.
- [2] QU Y B, JIANG G H, LI Z T, et al. Understanding rural land use transition and regional consolidation implications in China. *Land Use Policy*, 2019, 82: 742-753.
- [3] 王军, 钟莉娜. 中国土地整治文献分析与研究进展. *中国土地科学*, 2016, 30(4): 88-96. [WANG J, ZHONG L N. Literature analysis on land consolidation research in China. *China Land Sciences*, 2016, 30(4): 88-96.]
- [4] 王军, 钟莉娜. 土地整治工作中生态建设问题及发展建议. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 308-314 [WANG J, ZHONG L N. Problems and suggestion for developing ecological construction in land management work. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(5): 308-314.]
- [5] 曹小曙. 基于人地耦合系统的国土空间重塑. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2051-2059. [CAO X S. Geogovernance of national land use based on coupled human and natural systems. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2051-2059.]
- [6] 龙花楼, 张英男, 屠爽爽. 论土地整治与乡村振兴. *地理学报*, 2018, 73(10): 1837-1849. [LONG H L, ZHANG Y N, TU S S. Land consolidation and rural vitalization. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10): 1837-1849.]
- [7] 韩宗伟, 焦胜, 胡亮, 等. 廊道与源地协调的国土空间生态安全格局构建. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2244-2256. [HAN Z W, JIAO S, HU L, et al. Construction of ecological security pattern based on coordination between corridors and sources in national territorial space. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2244-2256.]
- [8] 沈悦, 严金明, 陈昊. 基于“三生”空间优化的城乡交错区土地整治功能单元划定. *农业工程学报*, 2018, 34(6): 244-255. [SHEN Y, YAN J M, CHEN H. Land consolidation function unit demarcation based on optimization of production, living and ecology space in peri-urban areas. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(6): 244-255.]
- [9] 刘春芳, 薛淑艳, 乌亚汗. 土地整治的生态环境效应: 作用机制及应用路径. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 685-693. [LIU C F, XUE S Y, WU Y H. Ecological environmental effects of land consolidation: Mechanism of action and application path. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 685-693.]
- [10] 王萌辉, 白中科, 董潇楠. 基于生态系统服务供需的陕西省土地整治空间分区. *中国土地科学*, 2018, 32(11): 73-80. [WANG M H, BAI Z K, DONG X N. Land consolidation zoning in Shaanxi province based on the supply and demand of ecosystem services. *China Land Science*, 2018, 32(11): 73-80.]
- [11] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知. *中国土地科学*, 2019, 33(7): 1-10. [CAO Y, WANG J Y, LI G Y. Ecological restoration for territorial space: Basic concepts and foundations. *China Land Science*, 2019, 33(7): 1-10.]
- [12] LI Y R, LI Y, FAN P C, et al. Land use and landscape change driven by gully land consolidation project: A case study of a typical watershed in the Loess Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(5): 719-729.
- [13] ZHANG Z F, ZHAO W, GU X K. Changes resulting from a land consolidation project (LCP) and its resource-environment effects: A case study in Tianmen city of Hubei province, China. *Land Use Policy*, 2014, 40: 74-82
- [14] LI P Y, CHEN Y J, HU W H, et al. Possibilities and requirements for introducing agri-environment measures in land consolidation projects in China, evidence from ecosystem services and farmers' attitudes. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 3145-3155.
- [15] 刘春芳, 乌亚汗, 王川. 基于生态服务功能提升的高标准农田建设的分区方法. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 264-272. [LIU C F, WU Y H, WANG C. Zoning method for well-facilitated farmland construction based on improvement of ecological services. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(15): 264-272.]
- [16] 田美荣, 高吉喜, 宋国宝, 等. 基于主导生态功能与生态退化程度的生态修复分区研究. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(1): 7-14. [TIAN M R, CAO J X, SONG G B, et al. Zoning for ecological remediation by dominant ecological function and ecological degradation degree. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(1): 7-14.]
- [17] 管青春, 郝晋珉, 许月卿, 等. 基于生态系统服务供需关系的农业生态管理分区. *资源科学*, 2019, 41(7): 1359-1373. [GUAN Q C, HAO J M, XU Y Q, et al. Zoning of agroecological management based on the relationship between supply and demand of ecosystem services. *Resources Science*, 2019, 41(7): 1359-1373.]
- [18] 曲衍波, 朱伟亚, 郇文聚, 等. 基于压力—状态—响应模型的土地整治空间格局及障碍诊断. *农业工程学报*, 2017, 33(3): 241-249. [QU Y B, ZHU W Y, YUN W J, et al. Land consolidation spatial pattern and diagnosis of its obstacle factors based on pressure-state-response model. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(3): 241-249.]

- [19] 胡宝清. 广西地理. 北京: 北京师范大学出版社, 2011. [HU B Q. Guangxi Geography. Beijing: Beijing Normal University Press, 2011.]
- [20] 李平星, 樊杰. 基于 VSD 模型的区域生态系统脆弱性评价: 以广西西江经济带为例. 自然资源学报, 2014, 29(5): 779-788. [LI P X, FAN J. Regional ecological vulnerability assessment based on VSD model: A case study of Xijiang River Economic Belt in Guangxi. Journal of Natural Resources, 2014, 29(5): 779-788.]
- [21] 魏子谦, 徐增让, 毛世平. 西藏自治区生态空间的分类与范围及人类活动影响. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2163-2174. [WEI Z Q, XU Z R, MAO S P. Classification, scope and the impact of human activities of ecological space in Tibet Autonomous Region. Journal of Natural Resources, 2019, 34(10): 2163-2174.]
- [22] 赵文武, 刘月, 冯强, 等. 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. [ZHAO W W, LIU Y, FENG Q, et al. Ecosystem services for coupled human and environment systems. Progress in Geography, 2018, 37(1): 139-151.]
- [23] YU Z W, XIAO L S, CHEN X J, et al. Spatial restructuring and land consolidation of urban-rural settlement in mountainous areas based on ecological niche perspective. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(2): 131-151.
- [24] CHEN J Y, JIANG B, BAI Y, et al. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimization. Science of the Total Environment, 2019, 650: 1426-1439.
- [25] WANG J, ZHAI T L, LIN Y F, et al. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China. Science of the Total Environment, 2019, 657: 781-791.
- [26] 彭建, 杨畅, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. 生态学报, 2017, 37(13): 4562-4572. [PENG J, YANG Y, XIE P, et al. Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong province based on the supply and demand of ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4562-4572.]
- [27] 顾康康, 杨倩倩, 程帆, 等. 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. [GU K K, YANG Q Q, CHENG F, et al. Spatial differentiation of Anhui province based on the relationship between supply and demand of ecosystem services. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(7): 577-583.]
- [28] BARÓ F, PALOMO I, ZULIAN G, et al. Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: A case study in the Barcelona Metropolitan Region. Land Use Policy, 2016, 57: 405-417.
- [29] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919. [XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.]
- [30] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [31] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746.]
- [32] XIE G D, ZHANG C X, LIN Z, et al. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services. Ecosystem Services, 2017, 26: 146-154.
- [33] 翟天林, 王静, 金志丰, 等. 长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析. 生态学报, 2019, 39(15): 5414-5424. [ZHAI T L, WANG J, JIN Z F, et al. Change and correlation analysis of supply-demand pattern of ecosystem services in the Yangtze River Economic Belt. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5414-5424.]
- [34] MA L, JIN F J, SONG Z Y, et al. Spatial coupling analysis of regional economic development and environmental pollution in China. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(3): 525-537.
- [35] WANG L J, ZHENG H, WEN Z, et al. Ecosystem service synergies/trade-offs informing the supply-demand match of ecosystem services: Framework and application. Ecosystem Services, 2019, 37: 1-12.
- [36] GONG J, LIU D Q, ZHANG J X, et al. Tradeoffs/synergies of multiple ecosystem services based on land use simulation in a mountain-basin area, western China. Ecological Indicators, 2019, 99: 283-293.
- [37] 广西壮族自治区政府办公厅. 广西壮族自治区生态功能区划. <http://www.gxzf.gov.cn/zwgk/zfwj/zzqrmzfbgtwj/2008ngzwbj/20080426-297944.shtml>. [Guangxi Zhuang Autonomous Region Government General Office. Ecological function zoning of Guangxi Zhuang Autonomous Region. <http://www.gxzf.gov.cn/zwgk/zfwj/zzqrmzfbgtwj/2008ngzwbj/20080426-297944.shtml>.]

Spatial zoning for land ecological consolidation in Guangxi based on the ecosystem services supply and demand

XIE Yu-chu^{1,2,3}, ZHANG Su-xin^{1,2}, LIN Bing^{1,2}, ZHAO Yin-jun^{1,2}, HU Bao-qing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf (Ministry of Education), Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 2. Key Laboratory of Earth Surface Process and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, CAS, Huanjiang 547100, Guangxi, China)

Abstract: Ecological consolidation is of great importance for land consolidation, and it is also the inevitable requirement of ecological civilization construction and rural revitalization strategy. The spatial zoning of ecological consolidation and differentiated management can contribute to economic development and human well-being. In this study, we aimed to characterize the relationship between ecosystem services supply and demand, and identify their spatial heterogeneity with Guangxi as a case study. Firstly, the ecosystem services supply was calculated by using revised value method, and the ecosystem services demands were characterized by using the socio-economic indicators. Secondly, through conducting the relationship framework between land ecological consolidation and ecosystem services, we analyzed and evaluated ecosystem service supply-demand space matching status, relationship, aggregation and coordination degree based on matching types, local spatial autocorrelation analysis and coordination degree. Finally, the spatial zoning of land ecological consolidation, and its regulation measures in different subareas were determined and discussed. The results showed that: (1) Both ecosystem service supply and demand of Guangxi had high spatial variations. The high supply of ES was mainly distributed in the mountainous forest areas or ecological function districts around Guangxi, while the low supply of ES was concentrated in cities. Ecosystem service demands were high in the southeastern Guangxi, whereas they were low in the northwestern Guangxi. (2) The differences of ecosystem services supply and demand spatial matching were obvious, and were grouped into four matching types. The average coordination degree of ecosystem services was 0.531, which was in a general equilibrium level, indicating that ecosystem services supply and demand was in an equilibrium state. (3) Based on the combination of the geographical environment characteristics, landscape heterogeneity and ecological function zoning, the 94 administrative county units in Guangxi could be classified into four land ecological management areas (HH area, LH area, LL area, and HL area), and 10 land ecological subareas. Differential management measures were proposed for each management area. HH area should focus on conservation and cultivation, and prohibit the large-scale construction. HL area should be protected comprehensively to improve production efficiency and management level. LH area should improve land use efficiency and implement comprehensive improvement measures. LL area should target at ecological reconstruction.

Keywords: ecosystem services; supply and demand; land ecological consolidation; spatial zoning; Guangxi