

基于双评价集成的国土空间地域功能优化分区

王亚飞^{1,2,3}, 樊杰^{1,2,3}, 周侃^{1,2,3}

(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; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要:“双评价”(资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价)作为构建国土空间的基本战略格局、实施功能分区的科学基础,为主体功能区降尺度传导、国土空间结构优化、国土开发强度管制等提供了一系列重要参数。以地域功能理论为基础,从人地关系演化出发,探索“双评价”的理论内涵,建立“双评价”到地域功能优化分区的科学逻辑,指出“双评价”集成实现综合效益最大化时所形成的主体功能分区方案为地域功能优化分区的最优方案。以福建省、六盘水市为案例,将人类生产生活的合理需求转化为用地需求参数,通过降尺度的参数分解与测算,结合上位规划及政府与专家系统研判,确定总量控制、结构化控制、空间结构或战略格局控制等目标参数,并在“双评价”基础上,通过不断调整指标、参数及阈值,逐步进行格网单元地域功能优化。着重考虑相邻区域功能冲突与协调、差异化的主体功能定位、土地利用现状及规划、区域发展战略格局以及海陆统筹等区域特征,不断校核与优化。从数据的可获取性、数据集满足理论模型及评估方法的适应程度、可使用的分析方法及模型的不确定性以及尺度效应等方面,探讨功能分区方案不确定性及其解决途径,增强优化结果的鲁棒性,以此作为“三区三线”划定等国土空间规划的科学基础。

关键词: 双评价;资源环境承载能力;国土空间开发适宜性;地域功能;优化分区;“三区三线”

DOI: 10.11821/dljy020190327

1 引言

地球表层同时存在着自然地理系统与社会经济系统两大系统,对于任一区域,都具有生态服务功能、人类生产、生活功能等多种功能属性,其本质区别在于自然综合条件以及对人类生产生活活动指向的不同。随着城镇化在全球更大范围地持续开展,人类开发地表的强度仍在增大,人类利用地表的功能也越来越复杂,人类生产、生活利用功能和地表自然生态系统保护功能之间在有限的国土空间内已经或将会面临冲突,如何合理界定、配置不同地表的保护和利用功能并以此为依据引导人类活动的合理分布,无疑将成为可持续性科学的一个重要命题^[1,2]。联合国《2030年可持续发展议程》提出系统实现粮食安全,建设可持续的城市和人类居住区,保护、恢复陆地生态系统及促进其可持续利用等一系列目标,这在发展中国家同时实现是极其困难的^[3,4]。以中国人文与经济地理学者为主的研究团队研制了中国首张国土空间综合开发保护前景图——中国主体功能区划,以城市化、农业安全、生态安全、遗产保护四类地域功能为主体功能,以县级行政

收稿日期: 2019-04-28; 修订日期: 2019-08-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630644); 中国科协高端科技创新智库青年项目(DXB-ZKQN-2017-048)

作者简介: 王亚飞(1988-),男,江苏赣榆人,助理研究员,主要从事地域功能与空间组织有序化研究。

E-mail: wangyafei@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 樊杰(1961-),男,陕西西安人,研究员,博士生导师,主要从事经济地理学与区域综合研究。

E-mail: fanj@igsnrr.ac.cn

区为基础单元,以期实现国家层面国土开发保护的有序性、可持续性^[5]。然而,为满足主体功能空间管制精准落地要求,需要进一步界定县级行政单元内部地块的功能,将主体功能降尺度传导,规范主体功能行为,推动主体功能区规划更加有效实施,一直是亟待开展的工作^[6,7]。

2017年中共中央和国务院印发《省级空间规划试点方案》,指出县市空间规划通过“三区”(城镇、农业、生态空间)比例落实主体功能定位,同时以“三线”(生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界)提升主体功能的底线管控要求,将省级空间规划确定的“三区三线”比例、开发强度等指标转化为具体坐标,实现主体功能区战略格局在市县层面精准落地。2018年4月,习近平总书记在深入推动长江经济带发展座谈会上的讲话中指出,要在开展资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(简称“双评价”)的基础上,抓紧完成长江经济带生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界三条控制线划定工作,科学谋划国土空间开发保护格局,建立健全国土空间管控机制。通过“双评价”科学认知国土空间格局分异的自然规律和社会经济规律,划分“三区三线”,已经成为国土空间规划的基础性工作。

城镇、农业、生态三类功能用地的不同空间配置将产生差异显著的空间效益,探索可持续发展框架下最优的空间组织方案是地域功能优化分区的核心所在。国际上可供我们借鉴的有关地域功能优化分区的研究,除了地理学本身有关自然地理分区、人文地理分区以及综合地理分区等研究,还包括两个方面:一类是立足于土地科学的土地(利用)系统研究,如可持续农业生产系统的空间配置、城镇扩张及合理发展边界的识别,或是农田系统与城镇扩张的冲突及合理性分析等,其本质是满足耕种或建设适宜性程度整体最优的土地配置方案^[8,9];另一类是立足于生态学的生态系统服务分区研究,如自然保护区划定、生态功能区划等,其假设前提是不同地块在生态系统中承担着水源涵养、防沙固土、保护生物多样性等不同生态服务功能,追求生态服务功能价值整体最大化目标^[10,11]。显然,如果在地域功能优化分区方案中要实现城市化较优配置、食物和生态安全较大程度得以保障的综合优化方案,就首先必须把这两类研究进行集成^[12,13]。国内有关的地域功能优化分区的相关研究主要包括地域功能及其空间结构的识别^[14-16]、“三生空间”分类^[17,18]、红线划定与管制^[19,20]等方面。其中,地域功能及其空间结构识别的研究主要集中于国家和省级等尺度,市县等小尺度研究相对薄弱^[21,22];“三生空间”分类的研究跨越国家、省、市、县、村镇等多个尺度,但侧重于基于现状土地利用/土地覆盖分类的现状识别;此外,当前已有一些学者对生态保护红线^[23,24]、永久基本农田^[20,25]、城镇开发边界^[19,26]的划定进行了较为深入的探索,但这些研究多侧重于单一功能的评估,缺少对地域功能的综合考量,在不同功能的集成评估过程中忽略了人类需求的合理性甄别以及自上而下的功能转换,从而影响了功能评估与优化的整体性、系统性与有效性。

“双评价”给出了格网单元生态保护、农业生产及城镇建设等功能指向的承载能力和适宜性,但如何基于“双评价”实现地域功能优化分区进而指导主体功能区降尺度传导以及“三区三线”划定,是本文研究的重点问题。本文以地域功能理论为基础,从人地关系演化出发,探索“双评价”的理论内涵,建立“双评价”到地域功能优化分区的科学逻辑,提出基于“双评价”集成的地域功能优化路径。通过基于“双评价”的控制性参数测算与降尺度分解,实现格网单元地域功能优化分区,结合福建省与六盘水市的实践工作,进行案例说明解析,并探讨地域功能优化分区结果不确定性及其解决途径,增强优化结果的鲁棒性,以此作为“三区三线”等国土空间规划的科学基础。

2 理论探索

2.1 双评价 的理论内涵

“双评价”指资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价。无论是资源环境承载能力，还是国土空间开发适宜性，均由自然环境与人类社会系统相互作用形成的概念。其理论内涵的探究都要回归到人地关系地域系统的理论本身寻找科学基点^[27,28]（图1）。

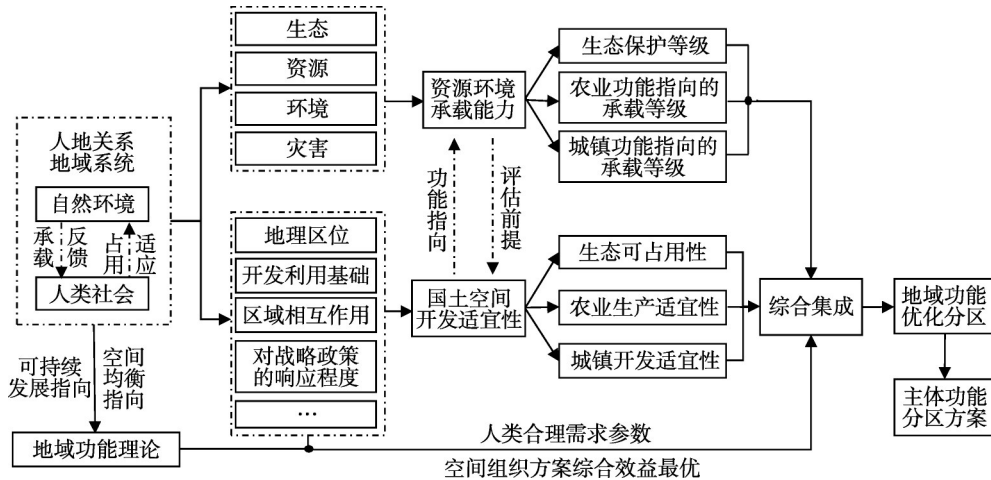


图1 “双评价”的理论探索

Fig.1 Theoretical exploration of "Double Evaluation"

资源环境承载能力是指自然环境 (X) 对人类生产生活活动 (Y) 的最大支撑能力或最高的保障程度，也可以作为人类社会系统与自然环境系统协调程度的量化指标。记为

$$F=f(X, Y) \tag{1}$$

式中：自然环境系统 X 是指资源环境等自然界物质系统构成的自然客体，同时具备生态属性、资源属性、环境属性、灾害属性等不同属性，表现为土地资源、环境、生态、灾害等不同要素。

$$X=C'_m(x_1, x_2, \dots, x_m) \tag{2}$$

式中：x₁, x₂, ..., x_m 代表土地资源、水资源、环境、生态、灾害等要素；m 表示构成自然环境系统的要素数；C 表示构成自然环境系统的要素组合函数；t 个要素的组合类型。

如此，承载力 F 还可以进一步表示为：

$$\begin{aligned}
 F=f[C'_m(x_1, x_2, \dots, x_m), Y] = & f_1(x_1, Y) \cup f_2(x_2, Y) \cup \dots \cup f_m(x_m, Y) \\
 & \cup f_{12}(x_1 \cap x_2, Y) \cup \dots \cup f_m(x_1 \cap x_m, Y) \cup \dots \cup f_{m-1,m}(x_{m-1} \cap x_m, Y) \\
 & \dots \dots \\
 & \cup f_{1 \rightarrow m}(x_1 \cap x_2 \dots \cap x_m, Y)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

式中：f_{ij} 表示要素 x_i 和 x_j 组合的承载体 (x_i ∩ x_j) 对人类生产生活活动 Y 的支持能力；∪ 表示不同要素承载能力的集成关系，这种集成关系具体的函数表达形式也可能不同；当 x_i 为单要素时，就可以理解为土地承载力、水资源承载力、环境承载力等单要素承载力。

然而，同样的 x_i ∩ x_j 因其承载的人类生产生活活动 Y 的强度或类型的不同而存在着 f_{ij} 的显著差异，这样就导致承载力 F 存在很大的不确定性。从成因学机理而言，x_i/x_j 的生成与演化受 Y 影响的程度、作用的因素等是不同的。只有当 Y 的地域功能类型确定时，X 的

各个分量才有明确的指向及开发阈值。从地域功能视角,按人类生产生活强度或类型可将 Y 划分为城镇建设、农业生产、生态保护等不同类型区,即

$$Y = U(y_1, y_2, \dots, y_n) = C_n^1(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (4)$$

因此, F 可进一步推导为:

$$\begin{aligned} F &= f[X, U_n^s(y_1, y_2, \dots, y_n)] = f[C_m^1(x_1, x_2, \dots, x_m), U_n^s(y_1, y_2, \dots, y_n)] \\ &= f_1[C_m^1(x_1, x_2, \dots, x_m), C_n^1(y_1, y_2, \dots, y_n)] \cup f_2[C_m^2(x_1, x_2, \dots, x_m), \\ &\quad C_n^1(y_1, y_2, \dots, y_n)] \\ &\quad \cup \dots \cup f_m[C_m^m(x_1, x_2, \dots, x_m), C_n^1(y_1, y_2, \dots, y_n)] \\ &= \{f_{11}[C_m^1(x_1, x_2, \dots, x_m), y_1] \cup \dots \cup f_{1n}[C_m^1(x_1, x_2, \dots, x_m), y_n]\} \cup \\ &\quad \{f_{21}[C_m^2(x_1, x_2, \dots, x_m), y_1] \cup \dots \cup f_{2n}[C_m^2(x_1, x_2, \dots, x_m), y_n]\} \cup \dots \\ &\quad \cup \{f_{m1}[C_m^m(x_1, x_2, \dots, x_m), y_1] \cup \dots \cup f_{mn}[C_m^m(x_1, x_2, \dots, x_m), y_n]\} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: y_1, y_2, \dots, y_n 分别代表城镇建设、农业生产、生态保护等不同功能区; 函数 U 表示不同类型区的并集; f_{ij} 表示 i 个要素组合类型的承载体 ($C_m^i(x_1, x_2, \dots, x_m)$) 对第 j 个承载对象 y_j 的支持能力。

因此, 只有当某一区域的功能指向明确时, 其承载能力才更具可操作性和应用能力, 也才有适宜性可言。对于生态保护功能而言, 国土空间开发适宜性是指生态系统空间被人类生产生活活动干扰或侵占所引发的生态效应或生态代价, 是从保护维度表征的生态系统不可被侵占的程度。对于人类生产生活活动而言, 包括城镇建设和农业生产功能, 国土空间开发适宜性不仅包括自然环境对人类生产生活活动支撑的适宜性指向(即承载能力), 还应该满足人类生产生活本身的空间组织规律, 正如区位论所说, 人类不同的生产和生活活动的区位指向是不同的, 每个地块对不同的生产生活活动的区位选择的适宜程度是不同的。因此, 国土空间开发适宜性, 除了自然条件的适宜性——资源环境承载能力 F , 还应考虑已有的开发利用基础、地理位置、区域间的相互依赖性、以及对战略政策的响应程度等, 这些无疑也是人类需求功能最终合理的区位选择的社会因素。显然, 这些因素的确定与选取的时空尺度密切相关, 随着时空尺度的不断减小, 评价单元之间相互作用的机理就更加复杂, 认知功能所需的因素群就愈加复杂, 因此, “双评价”从省级、市县等不同层级开展工作。

2.2 双评价到地域功能优化分区的科学逻辑

“双评价”给出了每一个格网单元用于城镇建设、农业生产或生态保护等不同地域功能的适宜程度, 但将其具体落地构成空间组织方案时就需要明确其主体功能。地域功能优化分区实际上是探索主体功能优化分区方案, 这种方案既要尽可能满足人类发展需求、符合地理事物空间组织规律, 同时以最小的生态环境为代价。如果这种组织方案还能够经得起时空变异的检验, 即在时空尺度上不同方案的变异性趋于最小, 这样的方案应该就是主体功能空间组织的最优方案。在揭示“双评价”理论内涵的基础上, 进一步从地域功能演化的视角, 解析“双评价”集成的科学内涵, 明确“双评价”到地域功能优化分区的科学逻辑(图2)。

人地关系地域系统理论指出, 地表格局及其演化过程, 是自然环境和人类活动长期共同作用形成。假设地表格局 R 由不同地块 r_i 构成, 表示为:

$$\sum_{i=1}^n r_i = R \quad (6)$$

式中: n 表示地块数量, 功能划分时通常取决于空间尺度。地球没有人类活动之前, 着

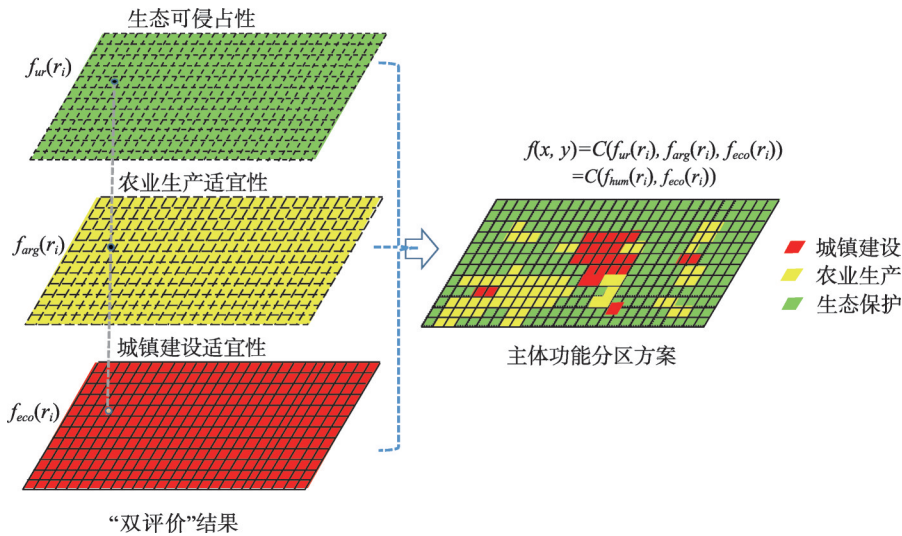


图2 “双评价”集成到地域功能优化分区的逻辑表达

Fig. 2 The logical expression between "Double Evaluation" integration and territorial function optimization regionalization

眼于地表格局 R 的演化过程，生态学理论揭示了每个地块 r_i 都具有在维系地表生态系统平衡中的服务功能，这种服务功能是多样的且有强弱之分，记为：

$$z(r_i) = \sum_{j=1}^m f_{eco(j)}(r_i) \tag{7}$$

式中： m 表示生态系统服务功能的种类。此时整个地表格局 R 的总体服务功能可表示为：

$$Z(R) = \sum_{i=1}^n z(r_i) + \mu \tag{8}$$

式中： μ 表示不同功能之间相互作用产生的外部性效应。当人类活动介入，地块 r_i 也具有承载人类不同生产生活功能需求的可能（ t 为人类需求功能的种类），即：

$$\Delta z_{Hum}(r_i) = \sum_{k=1}^t f_{Hum(k)}(r_i) \tag{9}$$

然而，人类在改造地表用于承载人类生产生活活动的同时，地块 r_i 的生态服务功能也在降低，记为

$$\Delta z_{eco}(r_i) = \sum_{j=1}^m \Delta f_{eco(j)}(r_i) \tag{10}$$

因此，对于每个地块来说，其承载的功能总当量为

$$\begin{aligned} z'(r_i) &= z(r_i) - \Delta z_{eco}(r_i) + \Delta z_{Hum}(r_i) \\ &= z(r_i) - \sum_{j=1}^m \Delta f_{eco(j)}(r_i) + \sum_{k=1}^t f_{Hum(k)}(r_i) \end{aligned} \tag{11}$$

对于整个地表而言，其总体服务功能效益可表示为：

$$\begin{aligned} Z(R) &= \sum_{i=1}^n z(r_i) - \sum_{i=1}^n \Delta z_{eco}(r_i) + \sum_{i=1}^n \Delta z_{Hum}(r_i) \\ &= Z(R) - \sum_{i=1}^n \Delta z_{eco}(r_i) + \sum_{i=1}^n \Delta z_{Hum}(r_i) \end{aligned} \tag{12}$$

着眼于生态系统可持续性最大化的要求，地域功能优化分区的基本要求是

$\min \sum_{i=1}^n \Delta z_{eco}(r_i)$ 但这样的结果通常难以满足人类活动最优区位选择的要求, 从而使得生活活动以丧失区位宜居、生产活动以丧失区位竞争力为代价。当然, 也不能以 $\max \sum_{i=1}^n z_{Hum}(r_i)$ 为目标, 这样就可能带来生态的巨大灾难和不必要的生态损失。因此, 在“双评价”的基础上, 进一步对“双评价”结果进行综合集成, 寻求 $\min \sum_{i=1}^n \Delta z_{eco}(r_i)$ 和 $\max \sum_{i=1}^n z_{Hum}(r_i)$ 之间的平衡关系, 从而实现地域功能优化的综合效益最大化。

3 控制性参数降尺度约束下的地域功能优化分区

3.1 基于双评价的控制性参数测算与降尺度分解

将人类生产生活活动的合理需求转化为用地需求控制性参数, 通过降尺度的参数分解与测算是“双评价”集成的关键步骤, 也是实现问题导向与目标导向并重的国土空间规划的重要科学基础。控制性参数包括总量控制参数、结构化控制参数、空间结构或战略格局控制参数等(表1)。

总量控制参数由政府与专家系统, 根据国土空间规划预期、各行业专家预测等, 预测或设定社会经济发展与生态环境指标, 包括森林覆盖率、城市化率、食物自给率、财政用于公共服务建设的预期水平等, 作为总量控制参数, 并将这些总量控制参数转换为人口或用地需求参数。如根据城镇化率、人口总量预测以及不同城市功能用地的合理人口密度, 测算城镇建设空间的总量参数; 根据食物自给率、人均食物需求量以及不同类型农牧功能用地的产量潜力, 测算该区域食物生产空间的总量参数。下层位的总量控制参数, 需要根据合理的上位规划或控制指标进行逐层级的指标分解。结构化控制参数, 通常包括最大开发强度、最小保护空间比重、三类功能空间比重结构、岸线开发强度、

表1 福建省和六盘水市的控制性参数列表

Tab. 1 Control parameters of Fujian province and Liupanshui city

案例区	总量控制参数	结构化控制参数	空间结构/战略格局控制参数
福建省	社会经济类: 常住人口、城镇化率、人口密度、地区生产总值、三次产业结构、粮食总产量、工业园区增加值产出效率、每公顷建设用地实现生产总值等 生态环境类: 森林覆盖率、主要河流 I~III类水质比例、海洋功能区水质达标率、海域一类、二类水面占比等	开发强度、城镇、农业、生态三类空间比例、自然岸线保有率、渔业资源保障线/占比、围填海控制线/占比等	生态安全格局: “三屏、六廊、十四片区” 城镇化主体形态: “一带、两区” 海洋开发与保护格局: “一带一屏, 两核三仓, 四湾八廊”
六盘水市	社会经济类: 常住人口、城镇化率、中心城区人口、地区生产总值、三次产业结构、工业增加值、单位面积城镇空间国内生产总值、耕地保有量等 生态环境类: 森林蓄积量、主要污染物排放总量、城镇污水处理率、地表水功能区水质优良比例、千人以上集中式饮用水源地水质监测达标率等	开发强度、城镇、农业、生态三类空间比例、永久基本农田面积、生态保护红线等	生态安全格局: “一心两翼四区六廊” 产业发展格局: “两带、三基地、四中心、五片区” 城镇空间发展格: “一主两副三组团, 双轴拓展多节点”

自然岸线保有率等，由上位国土空间规划或“双评价”结果衍生。全国尺度进行地域功能适宜性综合评估衍生出最大开发强度参数，由生态可侵占性评估结果衍生出最小保护空间参数，由三类功能评估衍生出的三类空间比重结构等空间管控参数，作为省级主体功能区划的关键结构化控制参数。同样，省级国土空间规划或“双评价”时，将结合全省以及各地级市的总量参数，将这些结构化参数逐步分解到各个地级市。如福建省确定到2030年全省开发强度控制在8.1%，结合“双评价”的评估结果，进一步分解到各个地级市，得到福州市为14.8%，三明市为3.9%等。当进行福州市或三明市的“双评价”集成时，14.8%、3.9%将成为由福建省向福州市或三明市降尺度传导的结构化控制参数，并将参数不断向区县层面降尺度传导（图3）。

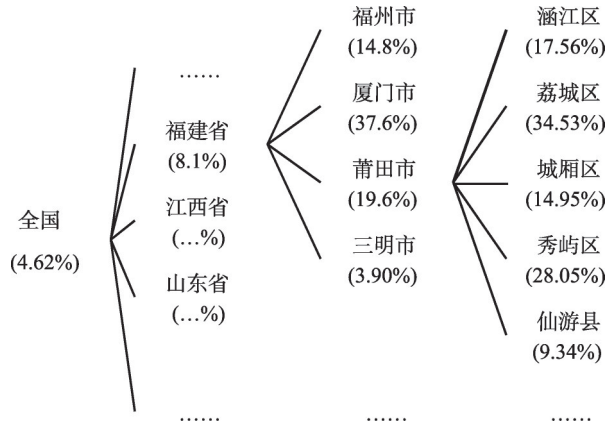


图3 福建省-市-县（区）三级开发强度逐级分解
Fig. 3 Downscaling decomposition of the development intensity at province-city-county (district) levels in Fujian

为了保障国土开发保护的有序性、系统性与完整性，战略格局或空间结构等控制参数往往由政府与专家系统根据上位国土空间规划或“双评价”结果共同确定，如全国城镇化战略格局、农业发展战略格局、生态安全战略格局，在各省（市、区）主体功能区规划时逐步落实。福建省空间规划试点提出“一带、两区、三类”城镇化主体形态以及“三屏、六廊、十四片区”的生态安全格局，作为空间结构控制参数，同时兼顾海陆统筹，与“一带一屏，两核三仓，四湾八廊”的海洋开发与保护格局相链接，在“双评价”集成以及“三区三线”划定时给予落实。

3.2 控制参数约束下的格网单元地域功能优化分区

“双评价”通过对水土资源、环境、生态、气候、灾害等要素的科学评估，集成出生态保护、农业生产、城镇建设三个功能指向的全覆盖的国土开发适宜性评价结果。由于构成“双评价”各项要素的各个阈值本身就具有丰富的科学内涵，其等级的高低本身在一定程度上表明其适宜程度，进行功能的相对比选时，根据格网单元不同功能的组合情况，采用不同的方法进行功能优化。

假设对某一评价单元*i*来说，其城镇建设、农业生产和生态保护的适宜性等级分别为 R_i 、 A_i 、 E_i ，从主体功能视角来看，其组合应该存在四种组合方式，如公式所示：

$$f(R_i, A_i, E_i) = C_3^0 f_0(R_i, A_i, E_i) + C_3^1 f_1(R_i, A_i, E_i) + C_3^2 f_2(R_i, A_i, E_i) + C_3^3 f_3(R_i, A_i, E_i)$$

式中： $C_3^0 f_0(R_i, A_i, E_i)$ 表示主体功能均不显著； $C_3^1 f_1(R_i, A_i, E_i)$ 表示存在一种主体功能； $C_3^2 f_2(R_i, A_i, E_i)$ 表示存在两种主体功能； $C_3^3 f_3(R_i, A_i, E_i)$ 表示存在三种主体功能； f_0 、 f_1 、 f_2 、 f_3 分别表示纵向叠加功能的选择函数。显然，对于 $C_3^1 f_1(R_i, A_i, E_i)$ ，即 R_i 、 A_i 、 E_i 之间等级数值差距较大且某一功能处于最高级时，以此功能作为该评价单元的主体功能；此时 f_1 即为取最大值函数。除此之外，可以设定不同的规则确定初始集成方案：①生态保护优先，只要 E_i 大于等于 R_i 、 A_i ，即设置主体功能为生态保护，且生态保护等级较高的区域往往是生态保护红线划定的候选区；②农业生产优于城镇建设，当 R_i 大于等于 A_i 时，即设置主体功能为农业生产，且往往农业生产适宜性等级较高的区域是永久基本农田的候选

区；③ 主体功能均不显著时，按邻近规则赋予相应的主体功能（图4）。

根据“双评价”的汇总结果，按照以上规则设置的初始集成结果是生态效益最大化的情景方案，而这种情景方案缺少社会、经济等效益的综合考虑，其最终的综合效益也并非是最高的。在初始集成结果的基础上，构建格网单元主体功能循环优化模型，不断优化功能分区方案，由生态效益的单一维度最大化向综合效益的最大化不断逼近。优化模型的关键在于：一是由政府与专家系统及“双评价”结果确定或衍生的总量控制参数或结构化控制参数，作为模型上位目标参数；二是根据不同功能的适宜性等级赋予不同的调整系数，计算每个格网单元不同功能用地能够承载的人口或粮食生产潜力等；三是将优化结果与初始集成结果进行对比分析，在此过程中不断调整指标与参数阈值等，最终达到优化结果与“双评价”集成方案的一致。在优化过程中，可调整的主要参数包括：评估格网精度、指标项中构成要素、指标总量的控制参数、战略格局或空间结构权重，以及模型运转过程中相关指标的阈值等。

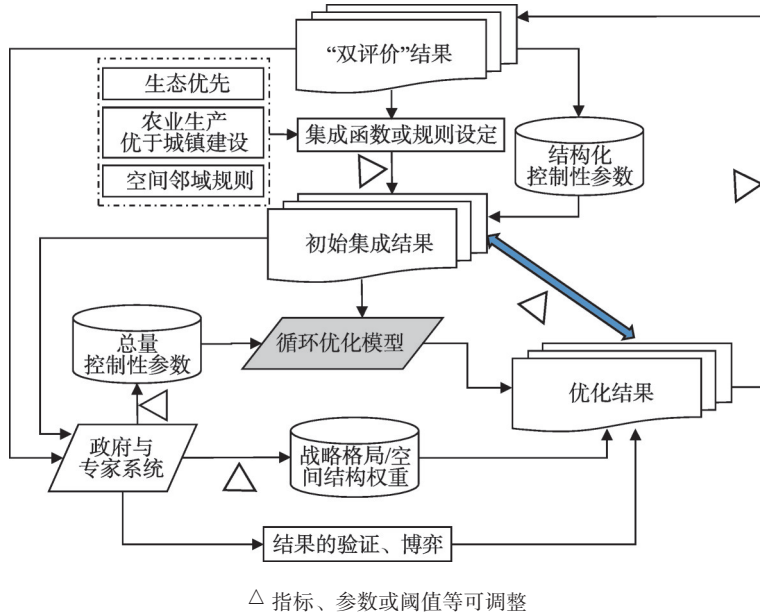


图4 控制性参数约束下的地域功能优化流程

Fig. 4 Territorial function optimization process under control parameter constraints

4 分区方案试划、校核与不确定分析

4.1 分区方案试划

“双评价”结果及其集成得到的不同情景格网单元主体功能分区方案，将作为地域功能优化分区的科学基础。其中，“双评价”集成评估的关键在于确定了每一个格网单元的功能类型组合函数，根据其主体功能的显著程度与组合状况，在控制参数约束下，提供了地域功能优化分区的不同情景方案。在地域功能优化的基础上，结合区域发展的趋势分析，包括重大基础设施建设、新兴产业布局的空间指向、未来发展的空间走势等，将微观的研究工作、前景预测纳入到宏观地理格局的分析和动态方案的研制中，同时将上位层级的空间组织方案作为下位层级落实的重要依据。

福建省和六盘水市地域功能优化分区过程中，均以生态优先为首要原则，城镇建设和农业生产都要让位于生态保护，尤其是生态保护红线区域。通常情况下将生态保护等级评估中生态重要性及生态敏感性等级为最高或次高的区域划定为生态保护红线候选区，再结合保护地的保护对象与等级以及生态系统的完整性划定生态保护红线。福建省生态保护适宜性高和次高等级的区域分别占17.8%、70.3%，其中次高等级与农业生产、城镇建设等级高的区域有所重叠，最终优化出74.9%的生态空间以及23.8%的生态保护红线。六盘水市生态优先保护区域和次优先保护区域分别为18.51%、46.85%，通过控制性参数的优化，划定为58.31%的生态空间以及15.51%的生态保护红线。显然，生态空间及生态保护红线由生态保护功能主导区域、农业生产-城镇建设的复合功能区域以及由生态系统完整性确定的部分无显著功能区域共同构成（图5）。其次，将城镇建设让位于农业生产作为次要原则，优先保护永久基本农田。在农业空间中，根据耕地质量等级和基本农田分布格局，进一步将农业空间中不得占用、不得开发、需要永久性保护的耕地划定为永久基本农田。福建省农业空间划定为27 396.0 km²，占全省土地总面积的22.1%，永久基本农田占国土面积比例为5.3%；六盘水市农业空间划定为3 675.14 km²，占国土面积的37.07%，永久基本农田占国土面积的12.32%。考虑生态保护红线和永久基本农田初划方案，结合城镇发展潜能、城镇开发指向和城镇布局现状初划城镇开发边界，按照预留开发建设规模，初划城镇空间。福建省在“一带”（沿海城镇密集带）“两区”（福莆宁和厦漳泉大都市区）城镇化格局指引下，优化出城镇空间总面积为3 679.1 km²，占全省陆域国土总面积的3.0%，包括9个地级市的中心城区、平潭综合实验区与其余县市的县城所在地。六盘水市形成以六盘水中心城区为主中心，盘州城区和六枝城区为副中心，10个重点镇为节点的“一主两副三组团，双轴拓展多节点”的城镇空间发展格局，优化出城镇空间为458.13 km²，占国土面积的4.62%，包括六盘水市中心城区、盘州城区、六枝城区及建制镇镇区（含乡政府驻地）。

4.2 分区方案校核与优化

地域功能优化分区是在“双评价”集成及优化评估的基础上，经过不同层级政府、不同利益部门以及专家参与的博弈过程确定，需要不断校核与优化，反复调整并修正。根据相关规划，结合专家知识，综合判断方案与实际空间分布格局的相符性。针对不符合实际情况的划定结果开展现场核查校验与调整，使评估结果趋于合理，最终勘定主体

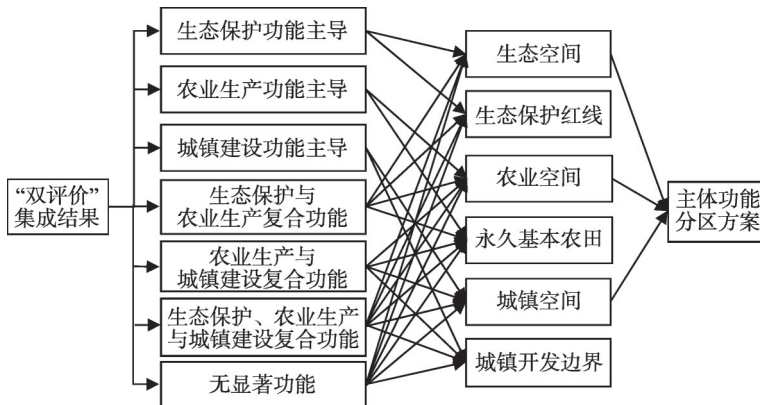


图5 “双评价”集成结果与主体功能分区及“三区三线”划定方案的对应关系

Fig. 5 The correspondence between the "Double Evaluation" integration results and the major function regionalization and the "Three Zones and Three Lines" scheme

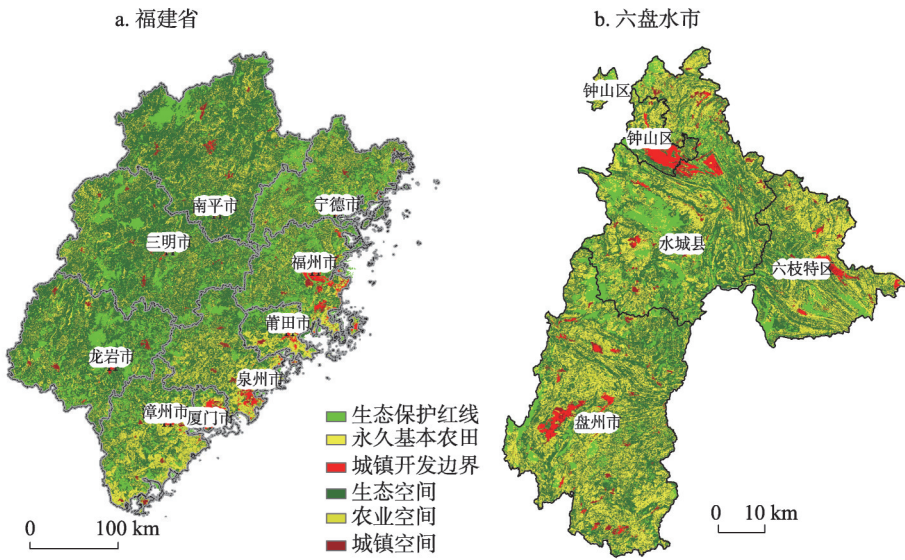


图6 福建省与六盘水市主体功能分区初步方案

Fig. 6 Preliminary scheme for the major function regionalization of Fujian province and Liupanshui city

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图(审图号:GS(2019)3333号)绘制,底图无修改。

功能分区边界与实体空间范围。主体功能分区方案的校核与优化着重考虑与主体功能区规划的衔接、与土地利用现状的衔接、与邻近区域方案的衔接、与区域发展和空间战略构建的需求相衔接以及海陆统筹关系(图7)。

4.2.1 与主体功能区规划衔接校验 城镇、农业、生态三类空间的比例关系应符合主体功能定位的相对关系。即城镇空间比重,要符合城市化地区(重点开发区域和优化开发区域)、农产品主产区、重点生态功能区依次降低的相对位序关系,生态地区比重呈相反的位序关系。方案要满足不同功能区定位的要求,即农产品主产区应确保永久基本农田

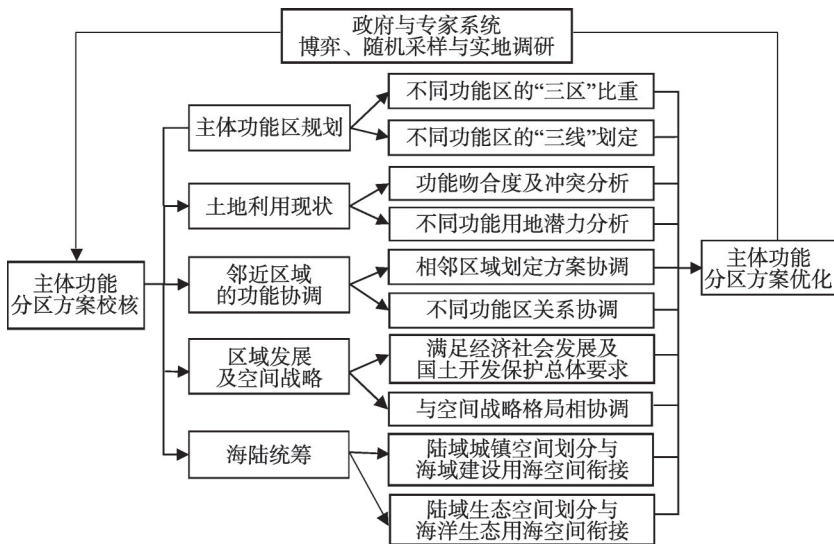


图7 主体功能分区方案校核与优化流程

Fig. 7 Major function regionalization scheme check and optimization process

规模和农业空间比重不降低,重点生态功能区应确保生态保护红线规模和生态空间比重不降低。

4.2.2 与土地利用现状的叠加校验 通过与土地利用现状的叠加,在土地利用功能归类的基础上,进行功能吻合度及冲突分析,原则上现状城镇建设用地均应落在城镇空间内,现状耕地通常应落在农业空间内,湿地、湖泊、林地等生态功能显著的区域应落在生态空间内。结合不同区域的功能定位,通过分析不同功能用地潜力的相对关系,校验方案的合理性。

4.2.3 与邻近区域的功能协调校验 邻近区域之间的分区方案不应发生功能冲突和干扰,如在城镇空间的上风上水区域,应保留一定范围的生态空间,而在生态空间的上风上水方向不应划定大面积城镇空间,位于行政边界周围均质性较强的区域应确定为同一空间类型。

4.2.4 与区域发展和空间战略构建需求衔接校验 方案划定应充分保障经济社会发展与国土开发保护的总体需求,城镇空间应满足健康推进城镇化的基本要求,农业空间应满足农产品供给安全要求,生态空间应满足区域生态安全格局建设要求。同时要充分考虑与区域发展空间战略衔接,集中型、绵延式城镇空间应与重点开发轴(带)建设相协调,农业空间应与粮食生产基地建设相协调,生态空间布局应与生态网络主骨架和重点生态廊道建设相协调,促进国土整体开发保护的均衡布局。

4.2.5 海陆统筹校验 沿海区域或海岸带主体功能优化分区时,应考虑海域开发利用潜力,结合毗邻海域适宜的功能类型、发展方向和管控要求,坚持海陆统筹、保护优先、陆域服从海洋的原则,将陆域城镇空间划分与海域建设用海空间衔接,将陆域生态空间划分与海洋生态用海空间衔接,修正并调整陆域海岸带区域三类空间适宜区范围,避免功能冲突、实现有机对接。

4.3 不确定性分析

受数据的可获取性、数据集满足理论模型及评估方法的适应程度、可使用的分析方法及模型的不确定性以及尺度效应等影响,直接导致主体功能优化分区方案的不确定性。首先,涉及水土资源、生态、灾害等调查数据以及人口、经济、环境污染等监测统计数据,需要通过区域间相互比对以及相关指标间的交叉检验等数据清洗方式消除数据的系统误差及随机误差,抑制数据本身的不确定性。尽管地域功能优化分区方案由政府牵头,掌握相关权威数据的业务部门也参与其中,但实际上仍难满足集成模型和方法的需求。如水资源量分配、生态系统服务功能调查、气象监测等数据多为相对宏观数据,环境监测、灾害等点状数据又为微观数据,升降尺度到同一评价单元上,均产生较大的不确定性。特别是在给定结构化控制参数、优化过程的调整参数等关键阈值时,由于数据集的适应程度不高,优化调控难度增大,往往导致分区优化结果大打折扣,甚至同预期有较大差距。弥补这一缺陷的主要方法,主要是将阈值选择一个数值区间,引入领域专家进行研判,以5%~10%的阈值容差确定不同阈值区间,按照原方案流程重复试验,分析区划结果的变化情况,采用格网结果和县级行政区结果相结合、定量和定性相结合的办法使不确定性得到合理控制。

“双评价”集成评估与地域功能优化分区过程中采用了一些分析模型作为辅助分析工具,这些模型的不确定性以及产生的区划方案的敏感性,也通常是在定性研判、反复调整、优化取舍中予以解决的。然而“双评价”集成评估与地域功能优化的评价单元为格网单元,省级通常选取50 m×50 m格网,市县级层面的网格精度通常为20 m×20 m~30 m×30 m。在这种微观尺度的分析框架下,任何一种功能类型的成因学机理都是复杂的,

作用因素也是多样的,产生的不确定性也较大。在实际操作过程中,结合功能类型成因的时空分异特征,从复杂的多因素集成分析中、转换为主导因素分析来确定不同尺度的城镇建设、农业生产和生态保护功能,其中,选择不同区域生态脆弱性因子识别生态空间、选择水热组合条件作为关键因子识别农业空间、选择用地条件和区位因素作为关键因子分析城镇空间,在检验分析模型的适用性和划定方案敏感性方面的有效性最高。此外,采用随机采样的方法获取一定数量的样本数据,确定60%~80%的主体功能覆盖阈值,通过政府与专家系统综合研判作为方案评估以及优化的重要依据,也将降低方案的敏感性。

5 结论与讨论

本文从人地关系地域系统出发,从地域功能成因学出发探索“双评价”的理论内涵,指出资源环境承载力在功能预设前提下才更具应用指向,由自然资源、环境、生态、灾害等多种属性与人类生产生活活动的相互作用关系及其系统集成确定,而国土空间开发适宜性是在承载力基础上考虑到功能的系统性与完整性、区位条件、现状开发基础、区域间的相互依赖性以及对战略政策的响应程度等共同决定。“双评价”到地域功能优化分区的科学逻辑在于,探索既要尽可能满足人类发展需求、符合人类生产生活空间组织规律,同时以最小的生态环境为代价、生态系统可持续性最大化的地域功能优化分区方案。如果这种组织方案还能够经得起时空变异的检验,即在时空尺度上不同方案的变异性趋于最小,这样的方案应该就是地域功能优化分区的最优方案。在此基础上,提出了基于“双评价”集成的地域功能优化分区研究路径,结合福建省、六盘水市空间规划试点工作,将人类生产生活活动的合理需求转化为用地需求控制性参数,通过降尺度的参数分解与测算,并在控制性参数约束下进行格网单元的地域功能优化分区,获取不同情景的主体功能分区方案,以此作为“三区三线”划定的重要依据。本文的研究成果能够服务于国家正在开展的国土空间规划工作,也将成为区域可持续发展与转型的科学基础。

然而,本文“双评价”集成及地域功能优化分区还存在以下局限:首先,“双评价”集成的本身是求解主体功能空间组织最优方案的最大综合效益函数,其构成各个分量诸如经济效益、社会效益、生态效益之间的关系均是时空变量的函数,未考虑系统的开放性,且忽略了子系统间的相互影响作用,而这些子系统尤其是人类社会因素作用机制相当复杂难以量化度量,因此“双评价”集成评估的科学理论还需要进一步探索;其次,从“双评价”到地域功能优化分区,其本质是明确每一个格网单元的主体功能,由于存在尺度效应、空间依赖性以及功能整体性、系统性的要求,均存在很大的不确定性,尽管文中提出了一些降低不确定性的方法,但仍然无法完全消除诸如边缘区、过渡区的功能不确定性;再者,“双评价”及主体功能分区方案与“三区三线”划定等国土空间规划的关系需要进一步厘清。“双评价”除了为国土空间的基本战略格局、功能分区提供重要依据,还为国土空间治理提供一系列重要参数,包括对主体功能降尺度传导、开发强度的管制以及有序化的国土空间结构,同时也为国土空间整治工程、领导绩效考核等政策制定提供重要依据,这些均需要进一步探索。此外,针对中国未来科技动态走势以及人地关系地域系统新框架的建构程度,需要及时优化调整主体功能分区方案。这种动态调整方案的方式,也是对不能完全准确预测未来的一种积极、有效的应对。

参考文献(References)

- [1] Fan Jie. How Chinese Human Geographers Influence Decision Makers & Society. Beijing: China Commerce and Trade Press, 2016.
- [2] Fan Jie, Wang Yafei, Wang Chuansheng, et al. Reshaping the sustainable geographical pattern: A major function zoning model and its applications in China. *Earth's Future*, 2019, 7(1): 25-42.
- [3] United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development Annex A/RES/70/1, 2015. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>, 2019-04-04.
- [4] Nilsson M, Griggs D, Visbeck M. Map the interactions between sustainable development goals. *Nature*, 2016, 534: 320-322.
- [5] 樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. *地理学报*, 2007, 62(4): 339-350. [Fan Jie. The scientific foundation of major function oriented zoning in China. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(4): 339-350.]
- [6] 王亚飞, 樊杰. 中国主体功能区核心-边缘结构解析. *地理学报*, 2019, 74(4): 710-722. [Wang Yafei, Fan Jie. Analysis of the core-periphery structure of major function oriented zones in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(4): 710-722.]
- [7] 樊杰. “人地关系地域系统”是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石. *地理学报*, 2018, 73(4): 597-607. [Fan Jie. "Territorial System of Human-environment Interaction": A theoretical cornerstone for comprehensive research on formation and evolution of the geographical pattern. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 597-607.]
- [8] Xu Yong, Tang Qing, Fan Jie, et al. Assessing construction land potential and its spatial pattern in China. *Landscape Urban Planning*, 2011, 103(2): 207-216.
- [9] Fan Jie, Wang Qiang, Wang Yafei, et al. Assessment of coastal development policy based on simulating a sustainable land-use scenario for Liaoning coastal zone in China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(8): 2390-2402.
- [10] Winemiller K O, McIntyre P B, Castello L, et al. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science*, 2016, 351(6269), 128-129.
- [11] Tilman D, Clark M, Williams D R, et al. Future threats to biodiversity and pathways to their prevention. *Nature*, 2017, 546(7656): 73-81.
- [12] Jackson S T, Duke C S, Hampton S E, et al. Toward a national, sustained US ecosystem assessment. *Science*, 2016, 354(6314): 838-839.
- [13] Xu Weihua, Xiao Yi, Zhang Jingjing, et al. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114: 1601-1606.
- [14] 王亚飞, 樊杰. 基于中国主体功能区划的国家与省级点-轴结构解析. *地理研究*, 2019, 38(7): 1651-1663. [Wang Yafei, Fan Jie. Spatial analysis of national-provincial pole-axis structure based on major function zoning in China. *Geographical Research*, 2019, 38(7): 1651-1663.]
- [15] 盛科荣, 樊杰. 地域功能的生成机理: 基于人地关系地域系统理论的解析. *经济地理*, 2018, 38(5): 11-19. [Sheng Kerong, Fan Jie. The formation mechanism of regional function: An analysis based on the theory of man-earth areal system. *Economic Geography*, 2018, 38(5): 11-19.]
- [16] 孙伟, 陈诚. 海岸带的空间功能分区与管制方法: 以宁波市为例. *地理研究*, 2013, 32(10): 1878-1889. [Sun Wei, Chen Cheng. Spatial function regionalization and spatial governance of the coastal zone: A case study in Ningbo city. *Geographical Research*, 2013, 32(10): 1878-1889.]
- [17] 张红旗, 许尔琪, 朱会义. 中国“三生用地”分类及其空间格局. *资源科学*, 2015, 37(7): 1332-1338. [Zhang Hongqi, Xu Erqi, Zhu Huiyi. An ecological-living-industrial land classification system and its spatial distribution in China. *Resources Science*, 2015, 37(7): 1332-1338.]
- [18] 邹利林, 王建英, 胡学东. 中国县级“三生用地”分类体系的理论构建与实证分析. *中国土地科学*, 2018, 32(4): 59-66. [Zou Lilin, Wang Jianying, Hu Xuedong. A classification systems of production-living-ecological land on the county level: Theory building and empirical research. *China Land Science*, 2018, 32(4): 59-66.]
- [19] 王颖, 刘学良, 魏旭红, 等. 区域空间规划的方法和实践初探: 从“三生空间”到“三区三线”. *城市规划学刊*, 2018, (4): 65-74. [Wang Ying, Liu Xueliang, Wei Xuhong, et al. The method and practice of regional spatial planning from "Three Basic Spaces" to "Three-zones and Three-lines". *Urban Planning Forum*, 2018, (4): 65-74.]
- [20] Li Xia, Li Dan, Liu Xiaoping, et al. Geographical simulation and optimization system (GeoSOS) and its cutting-edge researches. *Advances of Earth Science*, 2009, 24(8): 899-907. [黎夏, 李丹, 刘小平, 等. 地理模拟优化系统 GeoSOS 及前沿研究. *地球科学进展*, 2009, 24(8): 899-907.]
- [21] 王传胜, 赵海英, 孙贵艳, 等. 主体功能优化开发县域的功能区划探索: 以浙江省上虞市为例. *地理研究*, 2010, 29

- (3): 481-490. [Wang Chuangsheng, Zhao Haiying, Sun Guiyan, et al. Function zoning of development-optimized area at a county level: A case study of Shangyu, Zhejiang. *Geographical Research*, 2010, 29(3): 481-490.]
- [22] 陶岸君, 王兴平. 市县空间规划“多规合一”中的国土空间功能分区实践研究: 以江苏省如东县为例. *现代城市研究*, 2016, (9): 17-25. [Tao Anjun, Wang Xingping. Practice of territorial function regionalization in the integration of multiple plans at county level: A case study of Rudong county, Jiangsu province. *Modern Urban Research*, 2016, (9): 17-25.]
- [23] 郑华, 欧阳志云. 生态红线的实践与思考. *中国科学院院刊*, 2014, 29(4): 457-461, 448. [Zheng Hua, Ouyang Zhiyun. Practice and consideration for ecological redlining. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(4): 457-461, 448.]
- [24] 王丽霞, 邹长新, 王燕, 等. 基于 GIS 识别生态保护红线边界的方法: 以北京市昌平区为例. *生态学报*, 2017, 37(18): 6176-6185. [Wang Lixia, Zou Changxin, Wang Yan, et al. Methods to identify the boundary of ecological protection red line regions using GIS: A case study in Changping, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(18): 6176-6185.]
- [25] 钱凤魁, 张琳琳, 贾璐, 等. 基本农田划定中的耕地立地条件评价研究. *自然资源学报*, 2016, 31(3): 447-456. [Qian Fengkui, Zhang Linlin, Jia Lu, et al. Site condition assessment during prime farmland demarcating. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(3), 447-456.]
- [26] Chen Yiming, Li Xia, Liu Xiaoping, et al. Simulating urban growth boundaries using a patch-based cellular automaton with economic and ecological constraints. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(1): 55-80.
- [27] 樊杰, 王亚飞, 汤青, 等. 全国资源环境承载能力监测预警 (2014 版) 学术思路与总体技术流程. *地理科学*, 2015, 35(1): 1-10. [Fan Jie, Wang Yafei, Tang Qing, et al. Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity (2014). *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(1): 1-10.]
- [28] Fan Jie, Wang Yafei, Ouyang Zhiyun, et al. Risk forewarning of regional development sustainability based on a natural resources and environmental carrying index in China. *Earth's Future*, 2017, 5(2): 196-213.

Territorial function optimization regionalization based on the integration of "Double Evaluation"

WANG Yafei^{1,2,3}, FAN Jie^{1,2,3}, ZHOU Kan^{1,2,3}

(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; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As the scientific basis for constructing the basic strategic structures of territorial land space and implementing functional zoning, the "Double Evaluation" (i. e. resources and environmental carrying capacity and territorial development suitability evaluation) provides a series of important parameters for the downscaling of the major function zoning, the optimization of the spatial structure, and the intensity control of the land development. Based on territorial function theory, this paper explores the theoretical connotation of "Double Evaluation" from the evolution of human-land relationship, establishes the scientific logic of "Double Evaluation" to territorial function optimization, and points out that the major function regionalization scheme from "Double Evaluation" comprehensive integration that realizes the comprehensive benefit maximization is the optimal result of territorial function optimization. Taking Fujian province and Liupanshui city as two cases, we transform the rational demand of human production and living activities into the demand control parameters of land use. Combined with the superior planning and the government and expert system, we determine the critical target parameters, including the total control parameters, structural control parameters, spatial structure or strategic pattern control parameters, through the parameter decomposition and measurement of downscaling. By adjusting the indicators, parameters and thresholds, the grid cell territorial function optimization is continuously carried out, and the grid cell territorial function optimization regionalization schemes under different scenarios is obtained. Then continuous evaluation, check and optimization are carried out by the comparison with the planning of major function zones, land use status, neighboring areas, the construction needs of regional development and spatial strategy, as well as the relationship between land and sea. Given the influence of the uncertainty of available data, the adaptability of the data set to the theoretical model, the uncertainty of a usable analytical model and the scale effect, the uncertainty of the major function regionalization scheme and its solution are discussed to enhance the robustness of the optimization results as the scientific basis for territorial planning such as the "Three Zones and Three Lines" (Three Zones represent ecological space, agricultural space, and urban space; Three Lines represent ecological conservation redline, permanent capital farmland, and urban development boundary).

Keywords: Double Evaluation; resources and environmental carrying capacity; territorial development suitability; territorial function; optimization regionalization; "Three Zones and Three Lines"