

重庆市主体功能区识别的主导因素与空间稳定性约束机理

汪洋^{1,2,3}, 王力力¹, 祁鹏卫¹, 刘志海¹

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. GIS应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331;
3. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331))

摘要: 主体功能区规划已上升为国家制度和战略, 对中国长期空间发展格局优化与再组织将发挥积极的引导和约束作用。从地域性角度出发, 探寻主体功能区发生性(形成与演化)和反馈性(识别与规划)时空机理与规律是地理学具有时代意义的重要科学问题。以重庆市为例, 通过国土空间开发条件综合评价, 识别了主体功能区划分的适宜性空间格局。基于对西南山区发展约束条件的基本认识, 提出了地域主体功能空间分异的主导性约束假设, 设定地形和区位为原生性主导因素, 验证了其于区划指标系统的定量关联性, 以此为基础解析了主导因素约束机理并提出了地域主体功能区的空间稳定性机制。研究发现: ① 开发与保护适宜性识别结果的格局指向清晰。城市化适宜的区域主要集中于都市区和部分周边区县, 区域副中心(万州和黔江)适宜性也相对较高。生态保护适宜的区域集中于渝东北秦巴山区及部分三峡库区区县, 同时包括渝东南武陵山区所在区县。② 地形和区位因子在本区域对主体功能区的识别与形成具有主导约束作用。回归分析显示, 主体功能区划指标与地形因子相关性水平达到显著的超过70%, 区位因子超过40%; 两者综合后与区划标志变量(A、B指数)的相线性相关拟合度 R^2 均超过0.8; 地理探测器发现, 地形和区位因子对区划指标的约束性分别有9个和7个达到0.05显著性水平, 对A、B指数的解释度分别约为70%和60%, 两者叠加后, 约束水平全部达到显著, 对A、B指数的解释度在90%左右。③ 空间稳定性机制表现为两个方面, 其一是基于主导因素约束的稳定性传递机制, 称为客观稳定性; 其二是基于指标体系的局域相对性和算法的内部抵消机制, 称为主观稳定性。两种机制的协同性验证了区划技术系统的地域适应性和科学性。

关键词: 主体功能区识别; 主导因素约束; 空间稳定性机理; 地理探测器; 重庆市

DOI: 10.11821/dlxb201901004

1 引言

区域的协调与可持续发展是遵循自然发展规律、适应地域本底条件、体现人本理念的地理学经典命题^[1-3]。由于中国长期受限于区域空间管理“条块化”分割与发展定位“趋同化”模式, 缺乏差异化的空间发展“顶层设计”指引^[4], 一定程度上触发了某些区域资源衰竭、环境退化、自然灾害频繁等问题, 以及由此形成以空间、经济、社会、制

收稿日期: 2017-12-08; 修订日期: 2018-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308575, 41571419, 41601149, 41501582); 重庆市社会民生领域科技创新专项(cstc2015shmszx20014); 重庆市基础与前沿研究计划项(cstc2013jcyjA00012); 重庆师范大学博士启动基金项目(13XLB019) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.50738007, No.41571419, No.41601149, No.41501582; Chongqing Municipal Special Science and Technology Innovation Project in Social and People's Livelihood Field, No.cstc2015shmszx20014; Chongqing Foundation and Advanced Research Project, No.cstc2013jcyjA00012; Chongqing Normal University Doctoral Startup Fund Project, No.13XLB019]

作者简介: 汪洋(1978-), 男, 重庆北碚人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事山地空间规划与GIS空间分析研究。

E-mail: cqwangyang@foxmail.com

度、环境、生态等为节点的复杂问题链^[5]。主体功能区作为实施区域协调与可持续发展的重要制度性工具,其核心内涵是确定各地域单元在全国和省区等不同空间尺度中开发和保护的核心功能定位^[6],是对未来国土空间合理开发利用和保护整治格局的总体蓝图的设计、规划^[7]。作为区域有序发展的基本保障,空间管制是理性政府的理性作为^[8],以“主体功能区规划”为基础建立中国“空间规划”体系,在科学管治国土开发、协调区域发展方面意义重大^[9-11],而在此过程中,主体功能区的识别模式是保障“空间规划”体系可靠性、可实施性和权威性的重要理论基础,是地理学具有时代意义的重要科学问题。

主体功能区规划战略全面推进以来,学术界和相关政府职能部门相继展开区划理论、技术方法和政策设计等领域的研究^[12-14]。以樊杰为代表的科研团队系统阐述了中国主体功能区划的理论基础并整合形成了全国性规划方案^[15-17],为中国地理学深度参与国家空间决策搭建了平台。丁四保等指出了中国主体功能区划面临的基础理论问题^[18-20]。刘纪远等将主体功能区划与中国城乡建设用地扩张相结合,进行了时空特征遥感技术分析^[21]。韩青等对城市总体规划与主体功能区规划管制空间的相似性和差异性进行了分析,尝试探索城市总体规划与主体功能区规划管制空间的耦合关系^[22]。王强等学者将主体功能区划模型实践到不同省份^[23-26]。作为一种具有中国特色的开创性空间规划理论、技术与实践体系,目前学界对主体功能区的全局性(全国性或通用性技术验证)问题探讨较为集中,对主体功能区的地域性机理问题探讨相对较少。

基于此情况,本文基于重庆市国土空间开发条件综合评价,从空间客体(发生性形成与演化)和空间主体(反馈性识别与规划)两种认识论角度,提出4个前置性理论判断:①主体功能区的形成具有显著的地域性,也即不同地理环境下主体功能区的形成具有差异化的主导因素;②地域主体功能区的演化应当具有相当的稳定性,这种稳定性来源于主导因素的稳定性;③主体功能区的识别准确性依赖于区划技术系统的科学性,可通过主导因素与区划表征指标(如A指数)的协同性来侧面印证;④预先假设西南山地主体功能区的主导因素为地形条件和城市区位^①(基于国土空间开发条件综合评价结果猜想)。基于上述4个前置判断,通过重庆市案例剖析,引申至地理环境具有相似性的西南地区,通过数量性指标分析与比证,检验该区域主体功能区形成、演化的主导因素,理清其间的约束机制,以为主体功能区相关研究提供地域性视角。同时应当说明,主体功能区划方案(规划而非识别)的形成一方面依赖技术系统,另一方面专家系统和决策系统也会发挥积极作用,本文不涉及后一方面内容的探讨。

2 区划技术系统与主体功能区识别

2.1 研究数据与研究方法

以《省级主体功能区划分技术规程》^[27]为指引,通过集成重庆市各相关职能部门权威基础数据,建立重庆市主体功能区划空间数据库。搭建由社会经济发展状况、生态系统制约条件、资源环境支撑条件3大类共9个一级指标,及由此派生的5个综合指标构成的指标体系^[27](表1),以区县为基本评价单元,开展重庆市国土空间开发条件综合评价。在数据处理过程中,由于各指标数据分布的标准差很大,遵循“技术规程”建议,采用非线性自然断点法进行数据标准化,以达到组内差别最小,组间差异最大目的。

① 本文所指地形条件主要指高程和坡度(及其综合),不具有地貌类型含义;城市区位则主要指中心城市的辐射半径,通过欧氏距离表达。总体上,上述两个因素可视为地理空间常量。

表 1 指标与方法

Tab. 1 Data and methods

指标	指向	方法	参数含义
A	+	$A = k \times P1 - P2$	A 为国土空间开发条件综合评价指数; $P1$ 为社会经济发展状态和潜力系数; $P2$ 为生态系统特征系数; k 为资源环境支撑条件系数。
B	-	$B^{\text{②}} = f(Y_1, Y_2, Y_3)$	B 为国土空间开发条件综合判别指数; f 表示判别分析函数; Y_1 、 Y_2 、 Y_3 表示判别系数(其来源和内涵见脚注)。
$P1$	+	$P1 = [(PA^2 + ED^2 + TA^2)/3]^{1/2}$	$P1$ 为社会经济发展状态和潜力系数; PA 为人口集聚度; ED 为经济发展水平; TA 为交通优势度。
$P2$	-	$P2 = \text{MAX}(EV, EI)$	$P2$ 为生态系统特征系数; EV 为生态脆弱性; EI 为生态重要性。
$K(P3)$	+	$k = f(P3) = f(\text{MIN}(LR, WR) / \text{MAX}(NDR, EC))$	k 为资源环境支撑条件系数; LR 为人均可利用土地资源; WR 为人均可利用水资源; NDR 为自然灾害危险性; EC 为环境容量承载力; f 为函数, 将数据区间映射至 $[0.8 \sim 1.2]$ 。
人口集聚度	+	$PA^{\text{③}} = (PP/A) \times (PP/HP)$	PP 为常住人口; A 为幅员面积; HP 为户籍人口。
经济发展水平	+	$ED^{\text{④}} = PCG \times K$	PCG 为人均 GDP; K 为根据 GDP 增长率所得系数。
交通优势度	+	$TA^{\text{⑤}} = \alpha RD + \beta TTC + \gamma LA$	RD 为公路网络密度; TTI 为交通干线影响度; LA 为区位优势度; α 、 β 、 γ 为各自权重。
生态脆弱性	-	$EV^{\text{⑥}} = \text{MAX}(SEV, RDV)$	SEV 为土壤侵蚀脆弱性, 运用土壤侵蚀模数法, 采用水利部发布的土壤侵蚀分类分级标准并结合技术规程的规定进行评价; RDV 为石漠化脆弱性, 参考技术规程提供的分类标准; 以上两项采用较脆弱等级以上面积比例作为指标。
生态重要性	-	$EI^{\text{⑦}} = \text{MAX}(WC, SC, BM, SEI)$	WC 为水源涵养重要性; SC 为土壤保持重要性; BM 为生物多样性维护重要性; SEI 为特殊生态系统重要性; 以上几项采用中等重要等级以上面积比例作为指标。

② 对于判别指数 B , 其计算方法如下: 首先, 设定 3 个中间变量, $Y_1 \in [1, 3]$ 、 $Y_2 \in [1, 3]$ 和 $Y_3 \in [1, 2]$, Y_1 、 Y_2 和 Y_3 共计 18 种排列组合, 根据下列逻辑对“判别指数 B ”进行等级赋值: IF $Y_1 Y_2 Y_3 = 332$ OR 322 THEN $B = 1$; IF $Y_1 Y_2 Y_3 = 321$ OR 232 OR 331 THEN $B = 2$; IF $Y_1 Y_2 Y_3 = 231$ OR 222 THEN $B = 3$; IF $Y_1 Y_2 Y_3 = 132$ OR 221 THEN $B = 4$; IF $Y_1 Y_2 Y_3 = 131$ OR 312 OR 311 THEN $B = 5$; IF $Y_1 Y_2 Y_3 = 212$ OR 122 THEN $B = 6$; IF $Y_1 Y_2 Y_3 = 211$ OR 121 THEN $B = 7$; IF $Y_1 Y_2 Y_3 = 111$ OR 112 THEN $B = 8$;

Y_1 赋值规则如下: IF $(PA > 8 \cap ED > 8 \cap TA > 6)$ THEN $Y_1 = 3$; ELSE IF $(PA < 4 \cap ED < 4)$ THEN $Y_1 = 1$; ELSE $Y_1 = 2$; 斜体?

Y_2 赋值规则如下: IF $(EC < 4 \cap EI < 4)$ THEN $Y_2 = 3$; ELSE IF $(EC > 8 \cap EI > 8)$ THEN $Y_2 = 1$; ELSE $Y_2 = 2$;

Y_3 赋值规则如下: IF $(LR < 2 \cap Wq < 2 \cap EC > 8 \cap NDR > 8)$ THEN $Y_3 = 1$; ELSE $Y_3 = 2$;

基于 9 个一级指标分级结果(本文分 10 级, 技术规程分 5 级), 按上述逻辑进行组合, 得到 1 等至 8 等的适宜性判别序列(也即判别指数 B)。与 A 指数类似, 该序列同样表达了国土空间开发与保护适宜性, 等级越小表示开发适宜性越好, 保护适宜性越差, 等级值越大, 含义相反。

③ PA 在技术规程中算法为: $PA = [\text{人口集聚度}] = [\text{人口密度}] \times d_{[\text{人口流动强度}]} = PP/A \times d$ 。其中, $d_{[\text{人口流动强度}]} = [\text{暂住人口}] / [\text{总人口}] \times 100\%$ 。在征集部门意见时, 公安局户籍管理部门认为本市暂住人口的登记率并不高, 可能会导致数据失真, 所以对原有算法进行了适当改造, d 变化为 PP/HP (常住人口除以户籍人口), 大于 1 则表示聚集, 否则为流失。

④ ED 中, K 值按照《规程》设定, 按区间赋值, $< 5\%$ 赋 1, $5\% \sim 10\%$ 赋 1.2, $10\% \sim 20\%$ 赋 1.3, $20\% \sim 30\%$ 赋 1.4, 其余赋 1.5。

⑤ TA 中, RD 为公路网络密度, 取各区县高速、国道、省道和县道里程计算(县道以下不计入); TTC 按照铁路(高铁/单线/复线)、公路(高速/国道)、水运(枢纽港/一般港)、机场(干线/支线/通用)不同的交通干线的技术等级赋值, 然后加权汇总(参照《规程》); LA 区位优势度取重庆主城为唯一中心城市, 根据各县与中心城市的交通距离进行分级(但把万州和黔江两个副中心提高一个等级)。最后参照《规程》建议, 以等权重的方式求和得到每个区县 TA 值。

⑥ EV 中, SEV 为土壤侵蚀脆弱性, 以水土流失强度评价(按水土流失方程计算)为基础, 根据平均侵蚀模数进行分级(规程标准); RDV 为石漠化脆弱性, 按照基岩裸露、土被覆盖、坡度、土层厚度等要素进行脆弱性综合分级(规程标准)。把面积比例(较脆弱及以上等级)转换为区县评价单元指标。

⑦ EI 中, WC 按照流域(一二三级)和生态系统类型(森林、灌木、湿地、草甸、农耕)综合确定等级(规程标准); SC 按照生态系统类型和土壤侵蚀度综合确定等级(规程标准); BM 根据物种数量比率(通过专家咨询)确定等级(规程标准); SEI 根据地方特有区域(如三峡库区消落区)的保护价值(通过专家咨询实现)确定等级(地方性指标)。把面积比例(较重要及以上等级)转换为区县评价单元指标。

续表 1

指标	指向	方法	参数含义
人均可利用土地资源	+	$LR^{\text{⑧}} = (SL - EC - BF) / PP$	SL 为区县适宜建设用地面积； EC 为区县已有建设用地面积(适建区内)； BF 为基本农田面积(适建区内)； PP 为常住人口数。
人均可利用水资源	+	$WR^{\text{⑨}} = (W_L - W_E + W_I) / PP$	W_L 为本地可开发利用水资源量； W_E 为已开发利用水资源量； W_I 为可开发利用入境水资源量； PP 为常住人口。
环境容量/胁迫度	-	$EC^{\text{⑩}} = \text{MAX}(\alpha_{\text{SO}_2}, \alpha_{\text{COD}})$	α_{SO_2} 为大气环境容量/胁迫度； α_{COD} 为水环境容量/胁迫度。
自然灾害危险性	-	$NDR^{\text{⑪}} = \text{MAX}(GDR, FDR, EDR)$	GHR 为地质灾害危险性； FDR 为洪水灾害危险性； EDR 为地震灾害危险性。

根据主体功能区划技术系统设定^[1, 6-7, 27]，其指标系统明确的用于表征区域对于大规模城市化、工业化和人口聚集活动的适宜性，从指向角度分为正向和负向两类（表1“指向列”所示，“+”表示正向，“-”表示负向）。正向指数越大表示对大规模城镇、工业化和人口聚集活动的支撑能力越强，负向指数则相反。同时，为了充分体现样本数据的内部差异性，将指标分析结果标准化为10个等级（技术规程中为5级），1代表最小，10代表最大，用于表征上述支撑能力的相对强弱。

基于上述指标体系，主体功能区识别的标志性变量可归结为两种^⑫，其一是国土空间开发条件综合评价指数，简称 A 指数；其二是国土空间开发条件综合判别指数，简称 B 指数^[27]。根据这两个指数的数量特征，可明确判析区县单元的适宜性发展方向（开发或保护），可据其值域区间或组合特征提出优化开发区、重点开发区和限制开发区（生态功能区或农产品主产区）划分的技术预案。由于禁止开发区依据相关法律或法规单独划定，与上述指标体系的关系较弱，本文不展开讨论。

2.2 结果与主体功能区识别

经 GIS 空间分析，得到如图 1 所示的各指标空间格局。从单独指标角度看，评估结果呈现出如下基本特征：① 社会经济类指标空间同构特点较为突出（图 1g、1h、1i）。人口聚集度、经济发展水平和交通优势度基本空间结构特征类似，均表现为都市区 > 一小时经济圈 > 渝东北地区 > 渝东南地区；② 生态类指标的山地关联性较强且格局同构（图 1e、1f）。生态脆弱性和生态重要性均是渝东北和渝东南山区较高，以平行岭谷和浅丘为主的都市区和一小时经济圈相对较低；③ 资源环境类指标的要素依赖性较强，互相关性较弱（图 1a、1b、1c、1l）。人均可利用土地资源对地形条件的依赖性较强，人均可利用水资源受主要河流的区位条件影响较大，环境容量对水资源条件和产业结构的依赖性较

⑧ LR 中， SL =[适宜建设用地面积]=[坡度≤15度]∩[海拔<1200]-[所含河湖库等水域面积]-[所含林地面积]

⑨ WR 中， W_L =[地表水可利用量]=[多年平均地表水资源量]-[河道生态需水量]-[不可控制的洪水量]； W_E =[农业用水量]+[工业用水量]+[生活用水量]+[生态用水量]； W_I =[多年均入境水资源量]× γ ，重庆的入境河流设定为长江、嘉陵江和乌江三大水系， γ 按 5% 计算。

⑩ EC 中， α_{SO_2} 、 α_{COD} 容量(或承载力)计算方式均为： $\alpha_i = (P_i - G_i) / G_i$ ， i 为 SO_2 或 COD 。其中， G_i 为污染物环境容量， P_i 为某污染的排放量。 COD 和 SO_2 的环境容量计算按照《规程》规定方法计算，同时参照本地环保部门提供数据进行适当修订。

⑪ NDR 中， GDR 根据本地国土局地灾部门提供的地质灾害危险性评价图件进行矢量化，统计中度以上地灾危险性面积，根据其占比确定地灾危险性等级；洪灾则根据历史上最大洪水位绘制淹没区范围，结合近 50 年发生频率确定危险性等级；地震灾害根据时空频率和等级信息，结合对应的地震峰值加速度确定危险性等级。

⑫ 此外，还可应用“主导因素法”，根据开发类“主导因素”和保护类“主导因素”分别开展适宜性判别（详见《省级主体功能区划分技术规程》），以此验证区划技术方案，因其与区划指标关系不大，在本文中略过。

高, 自然灾害危险性主要受地形条件和水文条件的制约。由于制约要素空间格局的差异, 同时资源条件受人均量的平衡, 4个资源环境指标表现出了有差异的基本空间格局, 各个要素的互相关性特征不突出。

从综合指标角度看(图1j~1n), 评估结果呈现出如下基本特征: ① $P1$ 、 $P2$ 、 $P3$ 均呈现出不同程度的空间聚集现象, 表现出一定程度空间自相关性(图1j、1k、1l)。其中, $P1$ 的高值区域集中在都市区及周边区位条件较好区县。 $P2$ 的高值区域主要聚集于渝东北秦巴山系、三峡库区和渝东南武陵山系相关区县。 $P3$ 的高值区域主要聚集于山地特征值非高非低的非都市区范围。② $P1$ 、 $P2$ 、 $P3$ 的空间聚集格局不同构(图1j、1k、1l), $P1$ 和 $P2$ 显著负相关嵌套(图1j、1k), $P3$ 与 $P1$ 和 $P2$ 的空间格局差异明显, 且地域指示意义不显著(图1j、1k、1l)。③ 区划标志指标 A 、 B 的空间聚集特征明显(图1m、1n)且同构, 有一定空间自相关特征, 与社会经济综合指标($P1$)同向同构, 与生态综合指标($P2$)异向同构、与资源环境类指标(K)不存在格局继承关系。

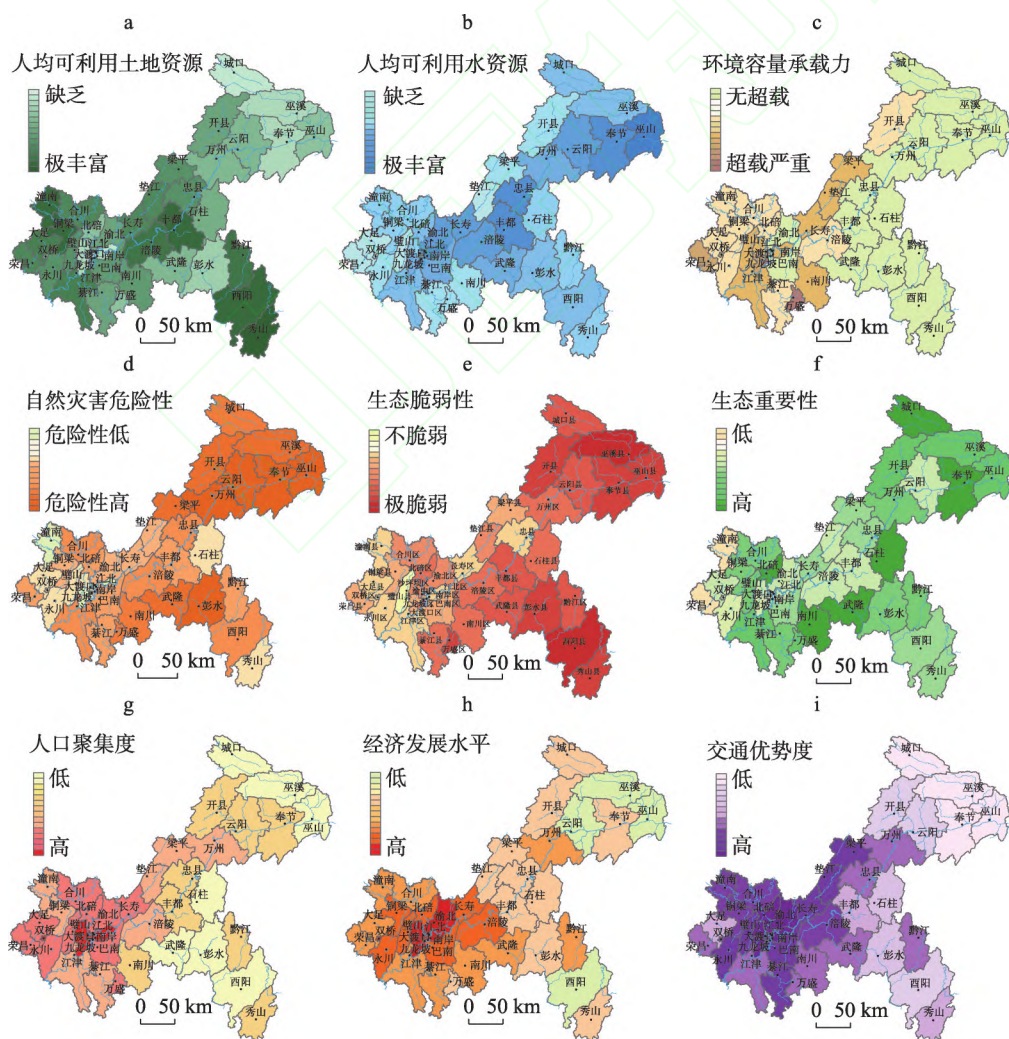


图1 重庆市国土空间开发条件综合评估结果

Fig. 1 Assessment results of territorial development conditions for Chongqing municipality

续图1

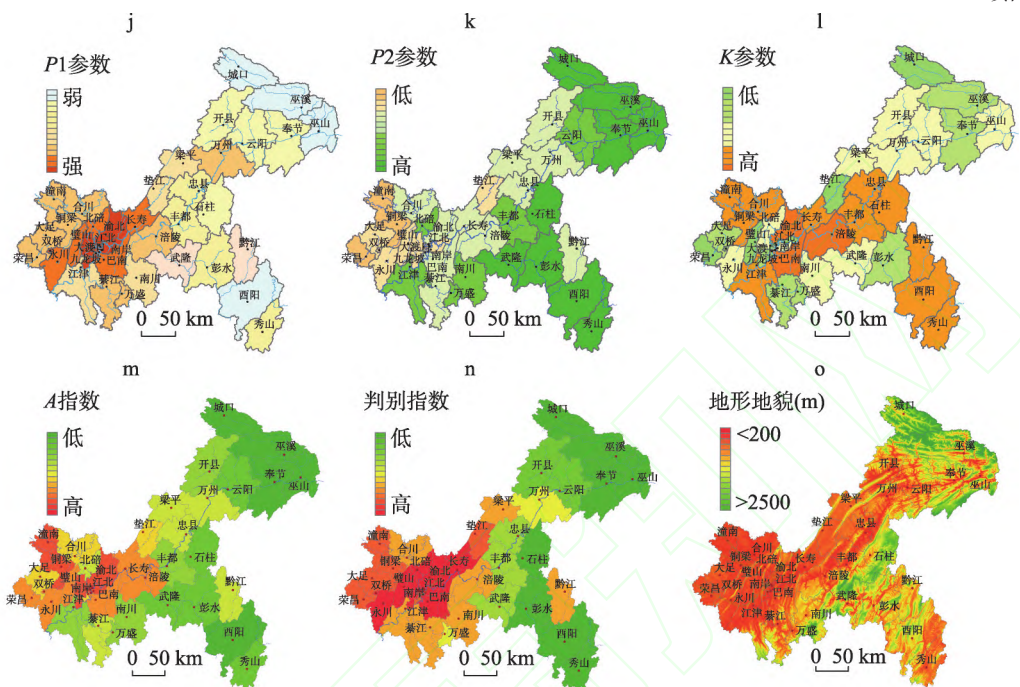


图1 重庆市国土空间开发条件综合评估结果

Fig. 1 Assessment results of territorial development conditions for Chongqing municipality

从识别结果角度看(图1m、1n), A 、 B 指数呈现出基本相似空间格局,但也存在值域区间的差别。相对于地形特征(图1o),均表现出较强的空间同构和自相关特性。因区划方案的形成还要接受专家系统和决策系统战略选择的检验和修正^[27],所以基于技术系统的区划预案(也即识别结果)与区划方案(也即规划结果)之间往往存在不同程度的差异^⑬。从该角度出发,有理由认为主体功能区识别的结果是一个分类概率,也即体现为“开发—保护”适宜性程度的数值索引序列。在该序列中,数值越大代表越适宜开发,反之越适宜保护,其中分类断点的设定与优化、重点、限制(包括重点生态功能区和农产品主产区)诸功能区的匹配关系目前尚无定论,所以本文认为主体功能区技术系统的识别结果主要表现为 A 值索引序列和 B 值判别分类序列,据此可进行后续分析。

3 主导因素的设定与检验

3.1 主导因素预设与标度

基于国土空间开条件综合评价,可从感性角度观察到靶区主体功能识别结果存在着一定程度的要素继承性和约束性,最明显的控制因素为地形、区位,表现为:①区划参数 A 、 B (图1m、1n)的空间格局相对于地形和区位条件兼具格局继承性(图1m、1o);②社会经济类指标($P1$ 、 PA 、 ED 、 TA)与地形和区位反向同构;③生态类指标($P2$ 、 EV 、 EI)与地形与区位格局同向同构;④资源环境类指标对区位因素表现出一定

⑬ 在首轮全国方案中(也即各省级规划整合方案),国家级优化开发区、重点开发区和生态功能区识别结果与规划结果之间的吻合度分别约为87%、62%和97%,参见参考文献[1]。

“反斥”特征,对地形因素表现出一定“非直接”继承性^⑭。⑤相对而言,社会经济类指标对区位因素的格局继承性更强,生态类指标(包括灾害)对地形因素的格局继承性更强,资源环境类指标表现出一定综合继承性,但显著度较低;⑥综合看,地形与区位因素对区划指标具有显著的控制力。为厘定其间定量关系,检验本区域主体功能的空间约束性机制,以区县为基本单元建立3个简单且与主体功能区划指标算法不冗余的指标:①地形指数(T);②区位指数(L');③地形—区位指数(TL'),数量标度如下:

$$T' = f(T) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (E_j - \bar{E})^2 / n} \times a \quad (1)$$

$$a = \begin{cases} 1.0 & < 300 \text{ m} \\ 1.1 & 300 \sim 500 \text{ m} \\ 1.2 & 500 \sim 800 \text{ m} \\ 1.3 & 800 \sim 1200 \text{ m} \\ 1.4 & > 1200 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

$$L' = f(L) = DIS(R, C) \quad (2)$$

$$TL' = T' \times W_T + L' \times W_L \quad (3)$$

式中: T' 为区县单元地形指数; f 表示0~1线性标准化函数; T 为标准化前地形指数; E_j 为某区县第 j 个网格单元(基于1:5万DEM模型计算)的高程值; $\bar{E}$ 为该区县的平均高程值; n 为该区县的网格单元数; a 为平均高程系数,结合地貌分类标准和重庆市高程分布特征,将区县平均海拔进行分级标度; L' 为区县单元区位指数; f 表示0~1线性标准化函数; L 为标准化前区位指数; $DIS(R, C)$ 表示区县(R)离区域中心(C)的平均距离计算函数(设定重庆市渝中区为市域中心)。 TL' 为地形—区位指数,为简化过程,直接设定地形指数和区位指数为等权重(W_T 和 W_L)。从主体功能区识别的指标指示意义角度解析,地形指数(T')表达原生性自然条件,值越大表示地形越复杂,高程越高,越不适合进行大规模城市化、工业化和人口聚集。区位指数(L')表达派生性人文条件,值越大表示离中心城市越远,城市及交通辐射能力越弱。前者可理解为适宜性的阻力要素,后者可理解为适宜性的动力要素。

3.2 回归分析检验

若设定地形指数(T')为主导因素标志变量,检验其与区划指标系统的相关性(图2a~2n)。根据相关性进行分类,可观察到:①相关性明显的独立指标有自然灾害危险性($r = 0.71$)、生态脆弱性($r = 0.81$)、生态重要性($r = 0.69$)、人口聚集度($r = -0.81$)、经济发展水平($r = -0.67$)、交通优势度($r = -0.75$),综合指标有 $P1$ ($r = -0.77$)和 $P2$ ($r = 0.82$);②相关性不明显的指标有人均可利用土地资源($r = -0.2$)、人均可利用水资源($r = 0.17$)、环境胁迫度和 k 参数($r = -0.1$)。③主体功能区识别的标志变量 A 指数和 B 指数与地形指数(T')均表现出明显相关($r = -0.86$, $r = 0.81$)。④特别地,将相关性不明显的人均资源类指标变换为比例指标(也即可利用土地资源比例)后,相关性显著上升,前者达到 $r = -0.71$,后者 $r = 0.39$ 。⑤由于综合指标 $P1$ 、 $P2$ 、 $P3$ (k)与9大独立指标具有派生性,所以有理由认为,与地形指数相关性不明显的指标只有两个,即可利用水资源和环境容量承载力。⑥综合识别参数 A 、 B 是前述指标的综合,地形条件越差(图2k) $P2$ 参数越高,地形条件越好(图2j) $P1$ 参数越高,同向强调了地形的约

⑭“反斥”特征含义是:区位条件最好的区域(即重庆主城区),其资源指标一般为最低或较低等级(因人均量的平衡),环境污染物排放强度一般最高或较高,自然灾害危险性一般为最低或较低(因大量城市工程性措施);地形因素的“非直接”继承性含义是:地形较好的区域人口、产业和城镇的聚集概率较大,间接导致污染物排放水平相对较高,反之则人口聚集水平较低,可能间接放大资源类指标计算结果(人均量)。

束性。综上特征,有理由认为地形条件作为主导因素的预设基本成立。

若设定区位指数 (L') 为主导因素标志变量, 检验其与区划指标系统的相关性 (图3)。可以发现: ① 社会经济类指标与区位指数的相关性均较高, 其中人口聚集度相关系数达到-0.75、经济发展水平达到-0.84、交通优势度达到-0.97。② 资源环境类与生态类指标与区位指数的相关性较低, 均低于0.6。③ 受指标算法的遗传性影响, 综合指标 $P1$ 与区位指数的相关性较高, 相关系数达到-0.86, $P2$ 为-0.56, $P3(k)$ 与区位指数的相关性均较低, 小于0.1。④ 同样受指标算法的遗传性影响, 功能区识别标志变量 A 指数与 B 指数与区位指数的相关性较高, 均达到显著水平。从上述数据特征可以推论, 区位条件 (本处表达欧氏距离含义, 下同) 作为影响区域地理格局的重要因素, 其对区域的城镇化、人口分布、产业布局、交通模式仍然发挥了重大影响。相对而言, 其对资源、环境和生态的原生性格局的影响尚不显著, 但这种不显著显然也受制于诸指标算法。总体而言, 若从主体功能区识别的角度看, 原生性区位条件对主体功能区的判别将产生主导性影响。在西南山地背景下, 将其作为主体功能区识别的另一个原生性主导因素是合理的。

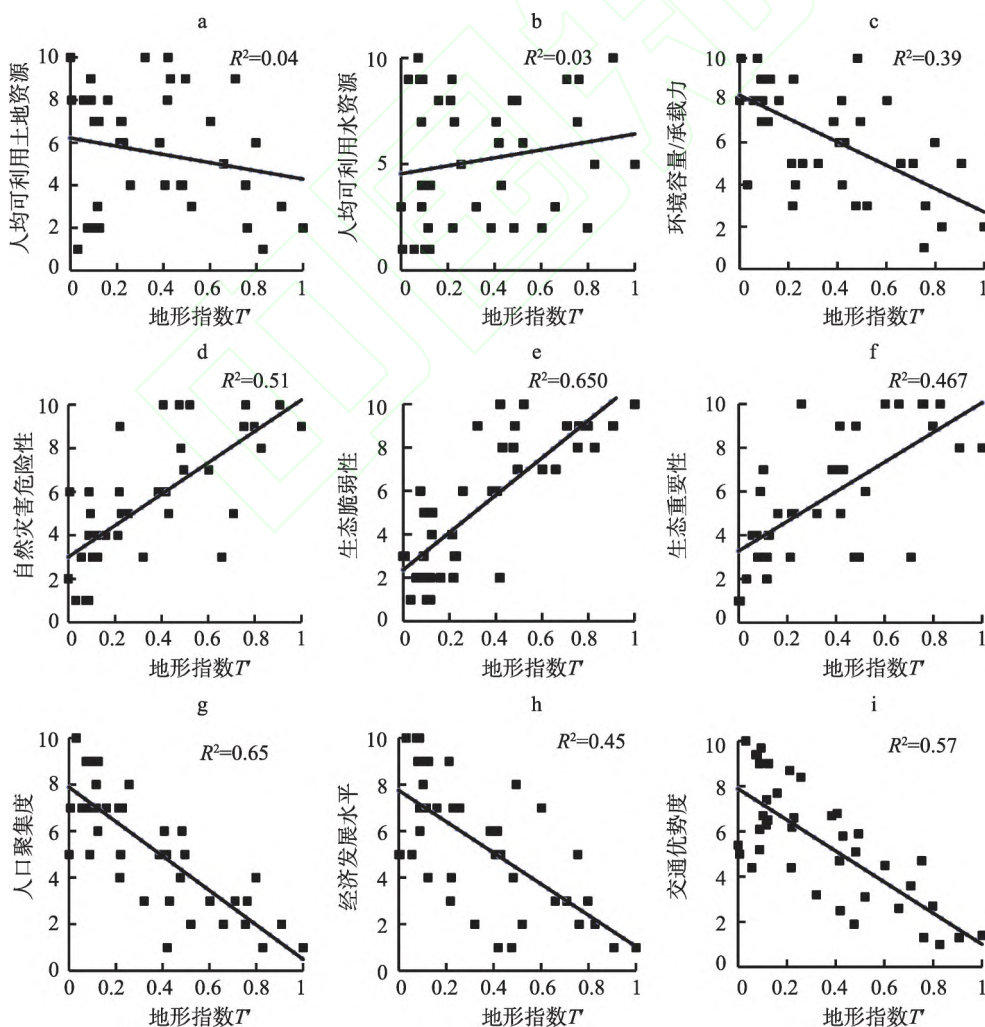


图2 指标与地形指数相关性

Fig. 2 Correlation between zoning indicators and topographic index

续图2

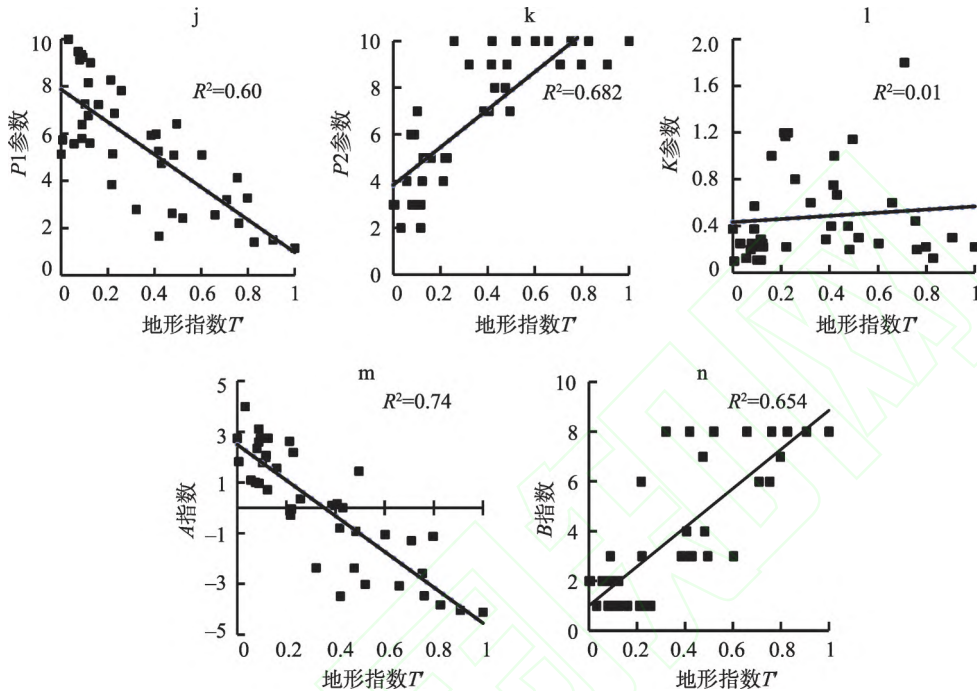


图2 指标与地形指数相关性

Fig. 2 Correlation between zoning indicators and topographic index

作为识别西南山地主体功能区的原生性主导因素,地形和区位(T 和 L)相对于功能区识别标志变量 A 和 B 均表现出了较高的相关性(r 分别为 -0.86 、 0.81 、 -0.82 、 0.82),因而具备一定的主导解释力。为进一步揭示这种相关性,同时也为验证其识别结果的一致性,构造地形—区位复合指数(TL'),将其与 A 指数与 B 指数分别做相关分析(图4a、4b),同时将地形指数(T')、区位指数(L')、地形—区位指数(TL')的分级结果(图5a、5b、5c)与 A 指数与 B 指数(图1m、1n)的分级结果(均为Nature Break, 8级)作对比,结果显示:① A 指数与地形区位指数 TL' 的相关系数 $r = -0.91$,达到显著性水平;② B 指数与地形区位指数 TL' 的相关系数 $r = -0.90$,也达到显著性水平;③地形指数(T')分级结果与 A 指数的分级结果吻合度为71.3%;④地形指数(T')分级结果与 B 指数的分级结果吻合度为63.7%;⑤区位指数(L')分级结果与 A 指数的分级结果吻合度为46.1%;⑥区位指数(L')分级结果与 B 指数的分级结果吻合度为60.8%;⑦地形—区位指数(TL')分级结果与 A 指数分级结果吻合度为83.5%;⑧地形—区位指数(TL')分级结果与 B 指数分级结果吻合度为76.7%。

对重庆市而言,通过上述主体功能区划指标系统和主导因素标志指标的对比检验,可发现:①两套系统(A 、 B 指数与 T' 、 L' 、 TL' 指数)的数量识别结果具有显著的相关性,且相关程度均达到显著性水平;②与主体功能识别结果具有较高的吻合度,其中地形—区位综合指数(TL')分级结果与 A 、 B 指数分级结果的吻合度分别超过80%和70%。总体而言, T 和 L 因子对主体功能区识别的标志性指向是显著的,主导性约束力是明确的。但与此同时,其约束力的控制性程度还需要进一步揭示。

3.3 地理探测器检验

地理探测器是探测地理空间分异性,揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[33]。根据

本文内容设定, 主要应用因子探测和交互探测来分析主导因素对识别结果的影响。因子探测用于揭示某因子 X 多大程度上解释了 Y 的空间分异, 如公式(4)所示, $i = 1, 2, \dots, n$ 为 X 自变量地形(T')或区位(L')的分级(分区)数量(Nature Break分为10级, 离散

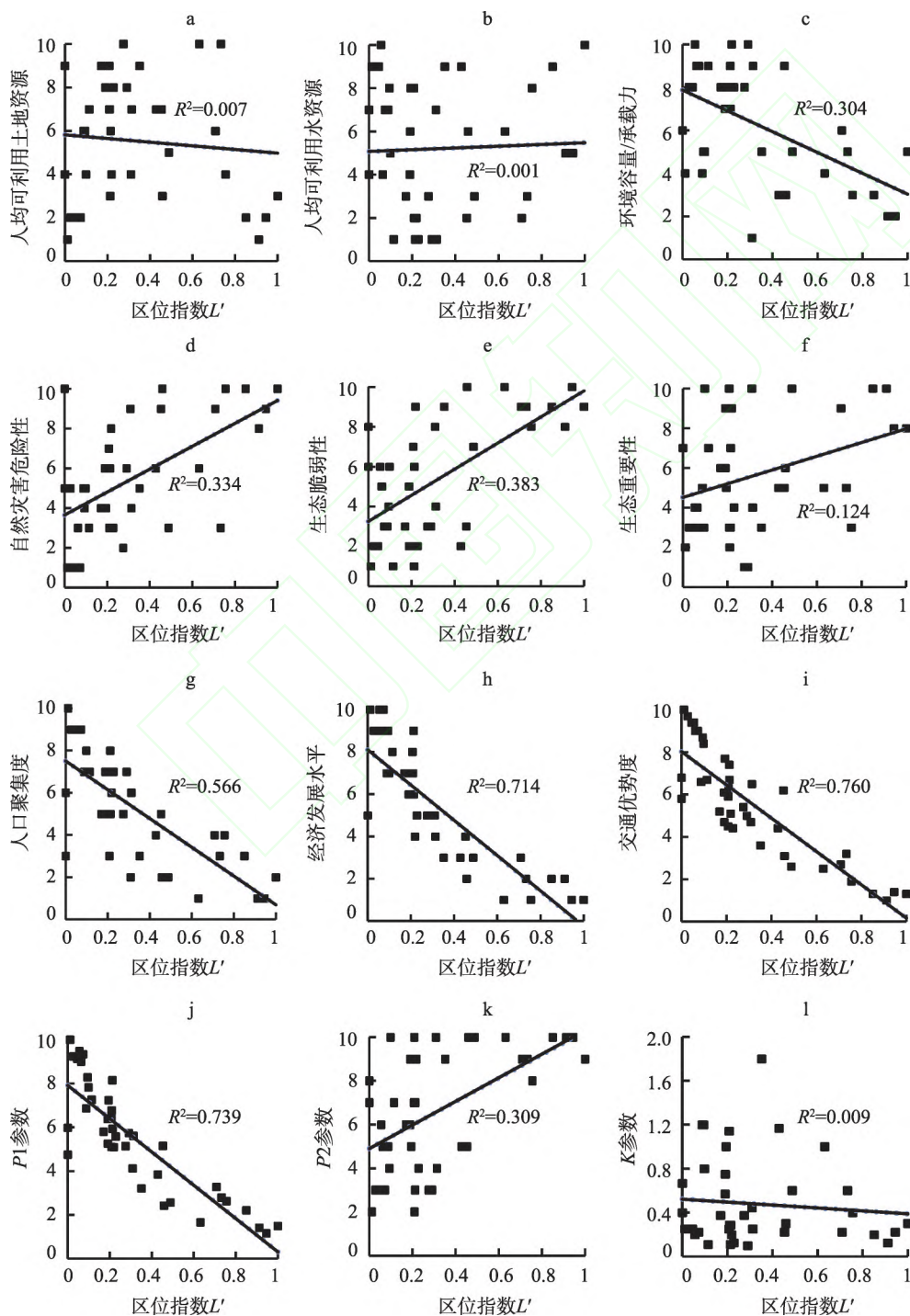


图3 指标与区位指数相关性

Fig. 3 Correlation between zoning indicators and location index

续图3

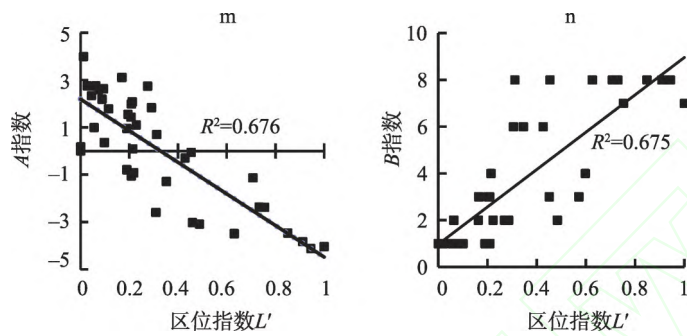


图3 指标与区位指数相关性

Fig. 3 Correlation between zoning indicators and location index

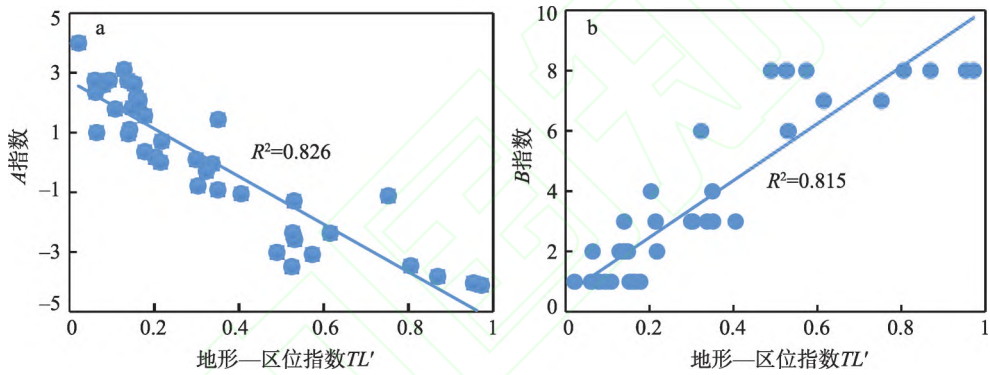


图4 A指数和B指数与地形—区位复合指数(TL')相关性

Fig. 4 Correlation between A/B index and Topographic-Location (TL') index

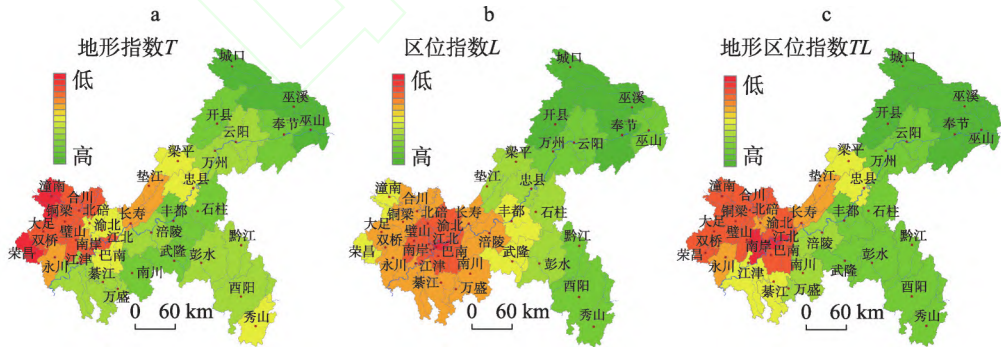


图5 主导因子的空间约束格局

Fig. 5 The spatial pattern of dominant factors

为类型数据)； N_i 和 N 分别为分级区内区县样本数和总样本数（重庆按40个总样本量计算）； δ_i^2 和 δ^2 分别是分级区内样本和全市 Y 值（即区划指标）的方差，按照地理探测器适用原则， Y 值采用未标准化之前的实型数据。若 $N\delta^2 \neq 0$ ，模型成立， q 的值域为 $[0, 1]$ ， q 值越大表示自变量 X 对 Y 的解释力越强，反之越弱。 q 值的理论含义是 X 解释了 $100 \times q\%$ 的 Y ^[33]。此外，交互探测器用于识别多因子之间的交互作用，根据两个因子 q 指数的数量关

系比较，表达其共同作用是增强还是减弱或独立，具体可细分为：Ⅰ非线性减弱；Ⅱ单因子非线性减弱；Ⅲ双因子增强；Ⅳ独立；Ⅴ非线性增强。

$$q=1-\frac{\sum_{i=1}^nN_i\delta_i^2}{N\delta^2}$$

(4)

探测结果表明（表2）：地形单因子对识别指标的约束性水平有9个达到0.05显著性水平，其中对功能区识别标志变量（*A*、*B*指数）的解释度超过70%；区位单因子对识别指标的约束性水平有7个达到0.05显著性水平，其中对*A*、*B*指数的解释度超过60%；地形和区位双因子综合后，对识别指标的约束性水平全部达到显著性水平，对*A*、*B*指数的解释度在90%左右；双因子的交互类型均为增强，可细分为双因子增强和非线性增强两类。上述结果与回归分析结论总体上一致，但也有少许区别，比如人口聚集度指标一个为显著一个为不显著，其原因一方面是两种分析的算法不一致，另一方面是原始数据标准化问题（回归基于标准化后数据，探测器基于非标准化数据）。总体看，从算法角度考察，地形（*T*）、区位（*L*）和与主体功能区划指标系统具有显然的独立性，不存在算法冗余，故有理由认为，该区域主体功能区识别的原生性主导因素可认定为地形条件和区位条件，两者综合在一起，共同约束了西南山地区域空间功能的形成和分异，且具有主导作用。

表2 基于地理探测器的因子探测与交互探测结果
Tab.2 Factors and interaction detection results based on Geo-detector

主导因素	识别指标													
	<i>PA</i>	<i>ED</i>	<i>TA</i>	<i>EV</i>	<i>EI</i>	<i>LR</i>	<i>WR</i>	<i>EC</i>	<i>NDR</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>k/P3</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
$q(T)$	0.31	0.41	0.61*	0.73*	0.66*	0.20	0.23	0.52*	0.68*	0.64*	0.79*	0.41	0.78*	0.70*
$q(L)$	0.56*	0.71*	0.83*	0.61*	0.27	0.45	0.26	0.37	0.52	0.83*	0.39	0.19	0.64*	0.74*
$q(T \cap L)$	0.99*	0.90*	0.92*	0.88*	0.76*	0.73*	0.77*	0.84*	0.86*	0.93*	0.87*	0.69*	0.89*	0.93*
交互类型	V	III	III	III	III	V	V	III	III	III	III	V	III	III

注：*表示*q*值在0.05水平上显著（*p*<0.05）。

4 主导因素的约束机理与空间稳定性

从主体功能区识别角度（反馈性约束），分析原生性地形因素（*T*）和区位因素（*L*）对功能区识别指标的约束机理（表3）。按前述定义，*T*和*L*分别代表地形条件和区位条件，值越小代表开发基础越好（越平坦且海拔较低，离中心城市距离越近），适宜城市化功能定位，反之则适宜重点生态功能或农产品产地功能定位。通过分析*T*和*L*与指标系统的相关性水平及数值传递逻辑来解析其间的约束机理，如*R*_{*A-T*}相关系数=−0.86，*R*²=0.74表示*A*指数与*T*指数的相关系数为0.86，线性相关拟合度*R*²=0.74。而*q*_{*T→A*}=0.78、*q*_{*L→A*}=0.64、*q*_{*T∩L→A*}=0.89分别表示地形*T*对*A*指数约束解释度为78%，区位*L*对*A*指数约束解释度为64%，两者叠加后（*q*_{*T∩L*}）为89%。而其后*T*↓→*P1*↑，*P2*↓，*P3*−→*A*↑表示*T*值越低（用地条件越好），会直接或间接引导*P1*值增大、*P2*值降低，*P3*值约束则不明显。进一步，*T*值对*P1*的约束可细化为对*PA*、*ED*和*TA*的约束，而对*PA*的约束可再细化为对*PP*的约束，这样通过二级或三级指标最终约束*A*值，其他指标的约束机制与此类似。以*T*对*A*的约束为例说明约束传递机理。如果*T*值越低，代表海拔适宜且地形越平坦，人口、产业和交通流量聚集的概率越大，则*P1*值越大。同理，水土流失、珍稀物种汇集等的概率越小，则*P2*值越低，同时*P3*（*k*）值的指向性不显著（内部互相抵消机

表3 主导因素与区划指标的约束关系解析表

Tab. 3 Constraint relation between dominant factors and zoning indexes

I 地形 约束 T	II 区位约 束 L	主体功能区识别指标	约束性水平	约束机理解析
$T=f(T_r, E)$ Tr:地形复 杂度 E:高程	$L=f(D)$ D:欧氏距 离	$A=f(P1, P2, P3)$ $B=f(Y_1, Y_2, Y_3);$ $Y1=f(PA, ED, TA);$ $Y2=f(EV, EI);$ $Y3=f(LR, WR, EC, NDR);$ $P1=f(\text{人口聚集度}(PA), \text{经}$ $\text{济发展水平}(ED), \text{交通优势}$ $\text{度}(TA))$ $P2=f(\text{生态脆弱性}(EV), \text{生}$ $\text{态重要性}(EI))$ $P3=f(\text{人均可利用土地资}$ $\text{源}(LR), \text{人均可利用水资源}$ $\text{(WR)}, \text{环境容量}(EC), \text{自然}$ $\text{灾害危险性}(NDR))$ $PA=f(\text{常住人口}(PP), \text{幅员}$ $\text{面积}(A), \text{户籍人口}(HP))$ $ED=f(\text{人均GDP}(PCG),$ $\text{GDP增长率}(K))$ $TA=f(\text{交通网络密度}(RD),$ $\text{交通干线影响度}(TTC), \text{区}$ $\text{位优势度}(LA))$ $EV=f(\text{土壤侵蚀脆弱性}$ $\text{(SEV)}, \text{石漠化脆弱性}$ $\text{(RDV)})$ $EI=f(\text{水涵养重要性}(WC),$ $\text{水土保持重要性}(SC), \text{生物}$ $\text{多样性维护重要性}(BM), \text{特}$ $\text{殊生态系统重要性}(SEI))$ $LR=f(\text{适宜建设面积}(SL),$ $\text{已有建设面积}(EC), \text{基本农}$ $\text{田}(BF), \text{常驻人口}(PP))$ $WR=(\text{可开发利用水资源量}$ $\text{(WL)}, \text{已开发利用水资源量}$ $\text{(WE)}, \text{可开发利用入境水资}$ $\text{源量}(WT))$ $EC=(\text{大气环境胁迫度}$ $\text{(}\alpha_{\text{so}_2}\text{)}, \text{水环境胁迫度}$ $\text{(}\alpha_{\text{COD}}\text{)})$ $NDR=(\text{地质灾害危险性}$ $\text{(GDR)}, \text{洪水灾害危险性}$ $\text{(FDR)}, \text{地震灾害危险性}$ $\text{(EDR)})$	$R_{A-T}=-0.86, R^2=0.74$ $R_{A-L}=-0.83, R^2=0.68$ $q_{T-A}=0.78, q_{L-A}=0.64, q_{T \cap L-A}=0.89$ $R_{B-T}=0.81, R^2=0.65$ $R_{B-L}=0.82, R^2=0.68$ $q_{T-B}=0.70, q_{L-B}=0.74, q_{T \cap L-B}=0.93$ $R_{P1-T}=-0.77, R^2=0.60$ $R_{P1-L}=-0.86, R^2=0.74$ $q_{T-P1}=0.64, q_{L-P1}=0.83, q_{T \cap L-P1}=0.93$ $R_{P2-T}=0.82, R^2=0.68$ $R_{P2-L}=0.56, R^2=0.31$ $q_{T-P2}=0.79, q_{L-P2}=0.39, q_{T \cap L-P2}=0.87$ $R_{P3-T}=0.13, R^2=0.01$ $R_{P3-L}=-0.12, R^2=0.01$ $q_{T-P3}=0.41, q_{L-P3}=0.19, q_{T \cap L-P3}=0.69$ $R_{PA-T}=-0.81, R^2=0.65$ $R_{PA-L}=-0.75, R^2=0.57$ $q_{T-PA}=0.31, q_{L-PA}=0.56, q_{T \cap L-PA}=0.99$ $R_{ED-T}=-0.67, R^2=0.45$ $R_{ED-L}=-0.84, R^2=0.71$ $q_{T-ED}=0.41, q_{L-ED}=0.71, q_{T \cap L-ED}=0.90$ $R_{TA-T}=-0.75, R^2=0.57$ $R_{TA-L}=-0.87, R^2=0.76$ $q_{T-TA}=0.61, q_{L-TA}=0.83, q_{T \cap L-TA}=0.92$ $R_{EV-T}=0.81, R^2=0.65$ $R_{EV-L}=0.62, R^2=0.38$ $q_{T-EV}=0.73, q_{L-EV}=0.61, q_{T \cap L-EV}=0.88$ $R_{EI-T}=0.69, R^2=0.47$ $R_{EI-L}=0.35, R^2=0.12$ $q_{T-EI}=0.66, q_{L-EI}=0.27, q_{T \cap L-EI}=0.76$ $R_{LR-T}=-0.22, R^2=0.04$ $R_{LR-L}=-0.14, R^2=0.01$ $q_{T-LR}=0.20, q_{L-LR}=0.45, q_{T \cap L-LR}=0.73$ $R_{WR-T}=0.17, R^2=0.03$ $R_{R-L}=0.11, R^2=0.01$ $q_{T-WR}=0.23, q_{L-WR}=0.26, q_{T \cap L-WR}=0.77$ $R_{EC-T}=-0.62, R^2=0.39$ $R_{EC-L}=-0.55, R^2=0.30$ $q_{T-EC}=0.52, q_{L-EC}=0.37, q_{T \cap L-EC}=0.84$ $R_{NDR-T}=0.71, R^2=0.51$ $R_{NDR-L}=0.57, R^2=0.33$ $q_{T-NDR}=0.68, q_{L-NDR}=0.52,$ $q_{T \cap L-NDR}=0.86$	$T \downarrow \rightarrow P1 \uparrow, P2 \downarrow, P3 \rightarrow A \uparrow$ $L \downarrow \rightarrow P1 \uparrow, P2 \rightarrow, P3 \rightarrow A \uparrow$ $T \downarrow \rightarrow Y1 \uparrow, Y2 \uparrow, Y3 \rightarrow B \downarrow$ $L \downarrow \rightarrow Y1 \uparrow, Y2 \rightarrow, Y3 \rightarrow B \downarrow$ $T \downarrow \rightarrow PA \uparrow, ED \uparrow, TA \uparrow \rightarrow P1 \uparrow$ $L \downarrow \rightarrow PA \uparrow, ED \uparrow, TA \uparrow \rightarrow P1 \uparrow$ $T \downarrow \rightarrow EV \downarrow, EI \downarrow \rightarrow P2 \downarrow$ $L \downarrow \rightarrow EV \rightarrow, EI \rightarrow P2 \rightarrow$ $T \downarrow \rightarrow LR \uparrow, WR \rightarrow, EC \uparrow,$ $NDR \rightarrow P3(k) \rightarrow$ $L \downarrow \rightarrow LR \rightarrow, WR \rightarrow, EC \uparrow, NDR \rightarrow$ $\rightarrow P3(k) \rightarrow$ $T \downarrow \rightarrow PP \uparrow, A \rightarrow, HP \uparrow \rightarrow PA \uparrow$ $L \downarrow \rightarrow PP \uparrow, A \rightarrow, HP \uparrow \rightarrow PA \uparrow$ $T \downarrow \rightarrow PCG \uparrow, K \uparrow \rightarrow ED \uparrow$ $L \downarrow \rightarrow PCG \uparrow, K \uparrow \rightarrow ED \uparrow$ $T \downarrow \rightarrow RD \uparrow, TTC \uparrow, LA \rightarrow TA \uparrow$ $L \downarrow \rightarrow RD \uparrow, TTC \uparrow, LA \uparrow \rightarrow$ $TA \uparrow$ $T \downarrow \rightarrow SEV \downarrow, RDV \rightarrow EV \downarrow$ $L \downarrow \rightarrow SEV \rightarrow, RDV \rightarrow EV \rightarrow$ $T \downarrow \rightarrow WC \downarrow, SC \downarrow, BM \downarrow, SEI$ $\downarrow \rightarrow EI \downarrow$ $L \downarrow \rightarrow WC \rightarrow, SC \rightarrow, BM \rightarrow, SEI \rightarrow$ $\rightarrow EIF \rightarrow$ $T \downarrow \rightarrow SL \uparrow, EC \uparrow, BF \uparrow, PP$ $\uparrow \rightarrow LR \rightarrow$ $L \downarrow \rightarrow SL \rightarrow, EC \uparrow, BF \downarrow, PP \uparrow$ $\rightarrow LR \rightarrow$ $T \downarrow \rightarrow WL \rightarrow, WE \uparrow, W_L, PP \uparrow$ $\rightarrow WQ \rightarrow$ $L \downarrow \rightarrow WL \rightarrow, WE \uparrow, W_L, PP \uparrow \rightarrow$ $\rightarrow WQ \rightarrow$ $T \downarrow \rightarrow \alpha_{\text{so}_2} \uparrow, \alpha_{\text{COD}} \uparrow \rightarrow EC \uparrow$ $L \downarrow \rightarrow \alpha_{\text{COD}} \uparrow, \alpha_{\text{COD}} \uparrow \rightarrow EC \uparrow$ $T \downarrow \rightarrow GDR \downarrow, FDR \uparrow, HDR \rightarrow$ $\rightarrow NDR \downarrow$ $L \downarrow \rightarrow GDR \rightarrow, FDR \rightarrow, HDR \rightarrow$ $\rightarrow NDR \rightarrow$

注：“↑”表示“升高”，正相关约束；“↓”表示“降低”，负相关约束；“-”表示约束性不明显，“→”表示导致。

制), $P1$ 和 $P2$ 共同放大 A 值, 共同约束 A 值较大。总体看, 主导因素的约束性机理特征可归结为: ① 在 14 个单项和综合指标中, 地形回归约束明显 ($R^2 > 0.45$, 且相关性达显著水平) 的有 10 个, 占 71.4%, 探测约束明显 (达显著水平) 的有 9 个, 占 64.3%; ② 区位的回归约束达到明显的有 6 个, 占 42.9%, 探测约束显著的有 7 个, 占 50%; ③ 地形—区位综合回归约束明显的有 11 个, 占 78.5%, 探测显著的 14 个, 达到 100%。④ 因子交互方式可归纳为二类, 其一为双因子增强 (ED 、 TA 、 EV 、 EI 、 EC 、 NDR 、 $P1$ 、 $P2$ 、 A 、 B); 其二为非线性增强 (PA 、 LR 、 WR 、 $k/P3$)。⑤ 地形因子对生态类 (EV 、 EI 、 $P2$) 和环境类 (EC 、 NDR) 指标的约束性较强, 区位因子对社会经济类指标 (PA 、 ED 、 TA 、 $P1$) 的约束较强。⑥ 地形和区位因子的主导约束性具有共生特征, 两者综合后具有极高解释力, 独立时解释力则较大幅度降低, 但依然较强。

从主体功能区形成与演化角度 (发生性约束), 其约束机理可解释为: ① 在西南地区水热条件相对均质前提下 (区域尺度), 地形条件直接控制水系发育格局和非地带性土壤的形成与演化, 与水、土资源格局直接相关; ② 地形要素对建设成本、交通便捷度、耕作效率 (水土条件) 等具有直接控制作用, 进而对城镇密集区和农业耕作区的形成和发展具有直接约束力, ③ 上述区域的发育会直接引导人口、产业和交通的基本格局 (分别对应人口聚集度、经济发展水平和交通优势度), 触发聚集效应; ④ 区域人口、产业和交通的聚散格局又会直接或间接的影响环境排放格局和总量 (环境容量承载力)、塑造地表人类活动生态结构 (影响灾害易损区格局); ⑤ 而地表人类活动强度与区域生物地理格局和生态扰动强度 (对应生态重要性和生态脆弱性) 又有一定联系; ⑥ 在上述过程中, 城市形成的初始区位并不完全由地形条件决定 (但依然受控于地形条件), 所以中心城市区位仍可视作原生性独立因素, 在区域发展过程中不断聚集人口和产业, 形成有别于农耕区的功能形态; ⑦ 主体功能区的形成与演化与上述内容皆有或强或弱约束性关联, 但溯源至始, 仍可发现其源头都脱不开地形与区位的基本约束, 历经时间雕琢, 形成独特的区域经济地理^[28-29]和地域生态格局, 基于相对优势, 通过地域劳动分工, 形成特定功能区域。

从主体功能区形成和发展角度 (客观稳定性), 以上述约束性现象和逻辑为基础, 可推断西南山地主体功能区应当具有一定程度的空间稳定性 (具有阶段性), 这种稳定性的基本来源是主导因素的稳定性。具体地, 通过 3 个环节实现: ① 主导因素的稳定性。相对于社会经济因子, 地形和区位 (欧氏距离) 主导因素相对不变; ② 基于约束机制的稳定性传递。工服业产品、生态产品和农产品供给区对地形和区位均有不同程度的约束性依赖, 这种依赖关系的的控制性因素是生产、运输和各类外部性成本, 在微观尺度上动态波动、在宏观尺度上阶段性稳定; ③ 功能区的稳定性。基于约束机制, 各类功能的形成和发育会表现出一定周期的稳定性格局。应当强调, 上述稳定性是一种宏观格局的稳定性, 且不绝对。当约束机制发生重大变化的时候, 这种稳定性就会被突破, 进入下一轮稳定周期。约束机制改变的本质是成本变化 (如与欧氏距离对应的时间距离变化导致成本变化), 除经济成本改变外, 资源、环境和生态的外部成本^[30-32]纳入统筹核算也是未来的趋势, 这也是下一阶段约束主体功能区空间稳定性的另一类重要因素。

从主体功能区识别和规划角度 (主观稳定性), 空间稳定性也同样具备约束机制。表现在: ① 区划是规划的基础; ② 区划方案由技术系统、专家系统和决策系统共同决定, 但以技术系统为蓝本; ③ 技术系统方案依赖于指标分析; ④ 指标算法本身就具有方案稳定性约束机制。得益于精妙且简洁的指标算法, 区划方案的稳定性具有较好的保

障,体现在:①局域样本和相对指标系统。自底向上,拼合省级规划形成全国方案^①。而省级区划根据内部样本数据统计特征分级(分5类,抹掉了数据噪声的同时也降低了数据敏感性),强调了区域性发展条件的内部相对可比性,同时分级阈值给予适当弹性空间,可保障在区域内部评价结果相对稳定;②指标体系全面、指示意义明确,集成算法稳定性强。包含了9大指标系统,每类指标的地理意义明确,同时 A 值集成算法稳定性和容错性较强。主要表现为:当 $P1$ 值增加时(代表人口、经济和交通要素聚集),资源类指标一般会降低(人均指标),同时环境类指标有可能会增加(污染排放增加),由此导致 $P3(k)$ 值下降。与此同时, $P2$ 值(生态)的变化幅度一般不大,且受地形条件控制。由于 $P1$ 和 $P2$ 在数值上一定程度抵消,使 A 值保持在一定的稳定区间,从而使主体功能区识别结果保持相对稳定。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文以西南地区典型省级单元重庆市为例,进行了市域尺度国土空间开发条件综合评价,识别了主体功能区划分的适宜性空间格局。基于对西南山区地域功能分异特征的基本认识,提出了地域主体功能的主导约束性假设,设定地形和区位为原生性主导因素,验证了其主体功能区划指标系统的定量关联性,以此为基础解析了主导因素约束机理并提出了地域主体功能区的空间稳定性机制。通过该过程,得到如下基本结论:

(1)市域国土空间综合评价识别出:适宜城市化的区域主要集中于都市区和部分周边区县,区域性副中心(万州和黔江)的适宜性也相对较高, A 、 B 指数空间格局的相似性和差异性同时存在, B 指数(也即判别分析法)被认为更具合理性^⑤;适宜承担生态功能的区域主要集中于两大片区,一是渝东北秦巴山区和三峡库区所在区县,二是渝东南武陵山系所在区县;粮食主产区的适宜性与指数的中值区间具有一定的对应关系,但这种关系不确切,需要引入专项指标(如耕地面积比例)进一步判别。

(2)回归检验发现:主体功能区划14个一级和综合指标中,与地形指数的线性相关拟合度较高($R^2 > 0.45$)且达显著水平的有10个,9个一级指标包含6个,相关性水平较低的指标有人均可利用土地资源、人均可利用水资源、环境胁迫度(环境容量)和 $P3(k)$,资源类指标去掉人均量纲后,显著性水平明显上升,其中可利用土地资源达到显著水平;与区位指数的线性相关拟合度较高($R^2 > 0.45$)且达显著水平的有4个,集中于人口聚集度、经济发展水平、交通优势度和 $P1$ 等社会经济类指标,区位指数与其它指标的相关性不明显;地形-区位复合指数与区划标志变量 A 、 B 指数表现出了更高的相关性, R^2 均超过0.8。

(3)地理探测检验发现:地形单因子对识别指标的约束性水平有9个达到0.05显著性水平,其中对功能区识别标志变量(A 、 B 指数)的解释度超过70%;区位单因子对识别指标的约束性水平有7个达到0.05显著性水平,其中对功能区识别 A 、 B 指数的解释度超过60%;地形和区位双因子综合后,对识别指标的约束性水平全部达到显著性水平,

^⑤ 重庆市是全国首批8个主体功能区规划试点省市之一,从2006年开始,形成了若干版本的区划方案且有10年期的保密约定。在此过程中,实验了多个版本的技术规程,更新了两次基础数据。近后,专家系统和决策系统认为基于判别分析法的评价结果(B 指数)更具有合理性,符合重庆市实际情况。基于此,经技术统筹后形成了重庆市主体功能区划方案(第一版,2011)并上报国家。

对功能区识别 A 、 B 指数的解释度在90%左右;双因子的交互类型均为增强,可细分为双因子增强和非线性增强两类。因地形与区位指数均为独立变量,与主体功能区划指标系统无算法冗余,据此,有理由认为地形和区位因素对地域主体功能区的识别和发展具有较强约束力,且发挥主导作用。

(4) 空间稳定性的约束机理可归纳为客观约束性和主观约束性两类。客观约束性通过3个环节实现,第一是地形和区位(指欧氏距离)主导因素自身的稳定性(因),第二是基于约束机制的稳定性传递(因),第三是功能区格局的稳定性(果);主观约束性通过两种形式实现,第一是指标体系的相对性和局域样本性,第二是指标算法的内部抵消机制。但与此同时,上述稳定性具有阶段性且不绝对。理论上,上述两种稳定性应该具有相当程度的协同性,主观分析(识别和规划)对客观规律(形成和发展)的准确揭示是科学性的基本保障,而本研究发现主体功能区划技术分析结果与主导因素的基本格局具有较高程度的协同性,说明技术系统具有较强的地域适应性和科学性。

5.2 讨论

作为一项基础性、约束性和长期性规划,两级(国家和省级)主体功能区划方案理应具有长周期稳定性和地域适应性,前述约束性和稳定性分析也证实了这一点。但与此同时,作为一种学术探索,仍有下述几个问题值得继续深入讨论:

(1) 技术系统与决策系统的协同性问题。前者基于数值分析,后者基于经验判断。第一轮区划采用两者互为印证的模式,是一种很好的解决协同性的方式。但与此同时,两者的边界也需要明确界定,比如在国家层面可不限定省级空间布局方案,但应当给出各功能区的适宜性比例区间,这对于全局性控制具有重要意义,同时又具备地方灵活性。

(2) 稳定性的突破机制问题。功能区设计是基于产品供给(工业产品、服务产品、生态产品和农业产品)的地域分工理论,具有时代性和技术经济条件依赖性,在信息时代背景下,功能区的设定与空间格局的地域性突破机制便凸显其研究价值。

(3) 功能定位的数值区间对位问题。实证研究发现,既有技术系统对于开发适宜性(优化区、限制区)和保护适宜性(限制区)的数值识别较为清晰,但对于优化(是否对应服务性产品)和重点(是否主要对应工业性产品)、生态功能区和粮食主产区的识别区间较为模糊,同时数值区间的线性关系不明显,还需要通过其它指标进一步判别。同时省级功能区(如乡镇单元的省级重点开发区)的划分口径、方法也因地而异,值得继续深化和规范。

(4) 资源环境的约束边界问题。实证研究发现,既有技术系统中资源环境参数对区划识别标志变量(A 、 B 指数)的约束性较低($P3$ 的数值区间被压缩),同时环境要素的次级指标内容不够全面(仅包括二氧化硫和氨氮指标)。在目前中国资源环境承载力对区域可持续发展造成了重大影响的情况下,丰富其评价内容,明确其数值约束边界显得较为急迫。但同时也可以注意到,资源环境承载力监测预警^[30-32]相关研究及对应约束性政策已稳步推开,采用该技术系统修订原有方法不失为一种可行的技术方案。

(5) 对西南山区的借鉴意义和主导因子假设成立的边界问题。对西南山区而言,其自然地理条件和社会经济演化脉络相对一致,故而本文结论应当具有一定程度的外推合理性,但也有待于其他省份实证研究的证实。基于这种一致性,其借鉴意义可归结为两方面:① 在理论层面摸清主体功能区识别与规划的基本约束条件与逻辑,基于主客观的协同性来保障规划方案的科学性。② 在实践层面可利用简化指标(T 、 L 、 TL)来判析区划方案的客观合理性;对非西南地区而言,本文结论显然不一定成立,但可根据各地

的地域性特征重新设定主导因素进行检验。一般而言,假设成立应至少满足4个边界条件:① 设定的2~3个主导因素标志变量应当与主体功能区划指标算法无冗余;② 基于感性观察,国土空间开发条件评价的大部分指标与主导因素的约束性空间格局应该具有继承性;③ 基于回归分析定量检验, A 、 B 指数与主导因素的相关拟合度均应较高($R^2 > 0.6$)且达显著水平;④ 基于地理探测器定量检验,主导因素交互探测($q(\text{因子}1 \cap \text{因子}2 \cap \text{因子}3)$ 或 $q(\text{因子}1 \cap \text{因子}2)$)结果指数 q 应当在0.8以上(即多个主导因子的综合解释度超过80%)。

参考文献(References)

- [1] Fan Jie. Draft of major function oriented zoning of China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 186-201. [樊杰. 中国主体功能区划方案. *地理学报*, 2015, 70(2): 186-201.]
- [2] Federal Office for Building and Regional Planning. *Spatial Development and Spatial Planning in Germany*. Bonn, 2001.
- [3] Moos A I, Dear M J. Structuration theory in urban analysis: 1. Theoretical exegesis. *Environment and Planning A*, 1986, 18(2): 231-252.
- [4] Fan Jie. Frontier approach of the sustainable process and pattern of human-environment system. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1060-1068. [樊杰. 人地系统可持续过程、格局的前沿探索. *地理学报*, 2014, 69(8): 1060-1068.]
- [5] Wang Jinbai, Zhao Min. Towards unified territory and urban-rural spatial administration frame work. *City Planning Review*, 2008, 32(12): 40-48. [汪劲柏, 赵民. 论建构统一的国土及城乡空间管理框架. *城市规划*, 2008, 32(12): 40-48.]
- [6] Fan Jie. The strategy of Major Function Oriented Zoning and the optimization of territorial development patterns. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2013, 28(2): 193-206. [樊杰. 主体功能区战略与优化国土空间开发格局. *中国科学院院刊*, 2013, 28(2): 193-206.]
- [7] Fan Jie. The scientific foundation of Major Function Oriented Zoning in China. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(4): 339-350. [樊杰. 我国主体功能区划的科学基础. *地理学报*, 2007, 62(4): 339-350.]
- [8] Batty M. Big data, smart cities and city planning. *Dialogues in Human Geography*, 2013, 3(3): 274-279.
- [9] Pham H M, Yamaguchi Y, Bui T Q. A case study on the relation between city planning and urban growth using remote sensing and spatial metrics. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(3): 223-230.
- [10] Fan Jie, Guo Rui. Discussing some core issues of innovated regional governance system oriented to the thirteenth national Five-Year Plan Period. *Economic Geography*, 2015, 35(1): 1-6. [樊杰, 郭锐. 面向“十三五”创新区域治理体系的若干重点问题. *经济地理*, 2015, 35(1): 1-6.]
- [11] Petra T, Robert Y. *America 2050: An infrastructure vision for 21st century America*. *Journal of Urban and Regional Planning*, 2009, 2(3): 18-38.
- [12] Hall P, Tewdwr-Jones M. *Urban and Regional Planning*. London: Routledge, 2010.
- [13] Ahern J, Cilliers S, Niemelä J. The concept of ecosystem services in adaptive urban planning and design: A framework for supporting innovation. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 254-259.
- [14] Childers D L, Pickett S T A, Grove J M, et al. Advancing urban sustainability theory and action: Challenges and opportunities. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 320-328.
- [15] Fan Jie, Zhou Kan, Chen Dong. Innovation and practice of economic geography for optimizing spatial development pattern in construction of ecological civilization. *Economic Geography*, 2013, 33(1): 1-8. [樊杰, 周侃, 陈东. 生态文明建设中优化国土空间开发格局的经济地理学研究创新与应用实践. *经济地理*, 2013, 33(1): 1-8.]
- [16] Fan Jie, Liu Yi, Chen Tian, et al. The key strategies and innovative thinking for optimization on spatial pattern of urbanization in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2013, 28(1): 20-27. [樊杰, 刘毅, 陈田, 等. 优化我国城镇化空间布局的战略重点与创新思路. *中国科学院院刊*, 2013, 28(1): 20-27.]
- [17] Fan Jie, Jiang Zilong, Chen Dong. Scientific foundation and practical strategies of collaborative planning for spatial layout. *City Planning Review*, 2014, 38(1): 16-25, 40. [樊杰, 蒋子龙, 陈东. 空间布局协同规划的科学基础与实践策略. *城市规划*, 2014, 38(1): 16-25, 40.]
- [18] Ding Sibao. Some basic theoretical issues faced with plan of major functional zone. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(4): 587-592. [丁四保. 中国主体功能区划面临的基础理论问题. *地理科学*, 2009, 29(4): 587-592.]

- [19] Wang Yu, Ding Sibao, Wang Rongcheng. Study on support system of the provincial main-functional zones planning. *Areal Research and Development*, 2009, 28(1): 17-21, 26. [王昱, 丁四保, 王荣成. 主体功能区划及其生态补偿机制的地理学依据. *地域研究与开发*, 2009, 28(1): 17-21, 26.]
- [20] Fang Zhongquan, Ding Sibao. Principal function area division and innovation of regional planning in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(4): 483-487. [方忠权, 丁四保. 主体功能区划与中国区域规划创新. *地理科学*, 2008, 28(4): 483-487.]
- [21] Liu Jiyuan, Liu Wenchao, Kuang Wenhui, et al. Remote sensing-based analysis of the spatiotemporal characteristics of built-up area across China based on the plan for major function-oriented zones. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 355-369. [刘纪远, 刘文超, 匡文慧, 等. 基于主体功能区规划的中国城乡建设用地扩张时空特征遥感分析. *地理学报*, 2016, 71(3): 355-369.]
- [22] Han Qing, Gu Chaolin, Yuan Xiaohui. Spatial coupling of the urban master planning and main functional area planning. *City Planning Review*, 2011, 35(10): 44-50. [韩青, 顾朝林, 袁晓辉. 城市总体规划与主体功能区规划管制空间研究. *城市规划*, 2011, 35(10): 44-50.]
- [23] Ma Renfeng, Wang Xiaochun, Zhang Meng, et al. The application and reflection of major function oriented zoning in Yunnan. *Geographical Research*, 2011, 30(7): 1296-1308. [马仁锋, 王筱春, 张猛, 等. 云南省地域主体功能区划分实践及反思. *地理研究*, 2011, 30(7): 1296-1308.]
- [24] Zhang Xiaorui, Zong Yueguang. Application of model and method in the planning of regional major functional zones: A case study of Beijing-Tianjin Region, China. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(5): 728-734. [张晓瑞, 宗跃光. 区域主体功能区规划模型、方法和应用研究: 以京津地区为例. *地理科学*, 2010, 30(5): 728-734.]
- [25] Wang Qiang, Wu Shidai, Li Yongshi, et al. The application of major function oriented zoning in Fujian Province. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(6): 725-735. [王强, 伍世代, 李永实, 等. 福建省域主体功能区划分实践. *地理学报*, 2009, 64(6): 725-735.]
- [26] Mi Wenbao, Yu Xiaoxia, Li Wenyan, et al. The systemic research idea on regional human resource management. *Economic Geography*, 2008, 28(6): 936-940. [米文宝, 余晓霞, 李雯燕, 等. 宁夏主体功能区划初步研究. *经济地理*, 2008, 28(6): 936-940.]
- [27] Office of Leading Group of National Major Function Oriented Zoning. Technical regulations for the Major Function Oriented Zoning at Provincial Level: On Trial. 2008. [全国主体功能区规划领导小组办公室. 省级主体功能区划分技术规程: 试用[S]. 2008.]
- [28] Fan Jie, Wang Yafei, Chen Dong, et al. Analysis on the spatial development structure of the Yangtze River Economic Belt. *Progress in Geography*, 2015, 34(11): 1336-1344. [樊杰, 王亚飞, 陈东, 等. 长江经济带国土空间开发结构解析. *地理科学进展*, 2015, 34(11): 1336-1344.]
- [29] Fan Jie, Wang Qiang, Zhou Kan, et al. Preliminary research on spatial pattern of urbanization in mountainous areas of China. *City Planning Review*, 2013, 37(5): 9-15. [樊杰, 王强, 周侃, 等. 我国山地城镇化空间组织模式初探. *城市规划*, 2013, 37(5): 9-15.]
- [30] 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 (V2014). *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(1): 1-10. [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.]
- [31] Fan Jie, Zhou Kan, Wang Yafei. Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (V 2016). *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 266-276. [樊杰, 周侃, 王亚飞. 全国资源环境承载能力预警(2016版)的基点和技术方法进展. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 266-276.]
- [32] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Jiang Dong, et al. The compilation of natural resources balance sheets (NRBS) and the evaluation of resources and environment carrying capacity (RECC). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7140-7145. [封志明, 杨艳昭, 江东, 等. 自然资源资产负债表编制与资源环境承载力评价. *生态学报*, 2016, 36(22): 7140-7145.]
- [33] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]

Revealing the dominant factors and spatial stability restrictive mechanism for Major Function-Oriented Zoning in Chongqing municipality

WANG Yang^{1,2,3}, WANG Lili¹, QI Pengwei¹, LIU Zhihai¹

(1. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Key

Laboratory of GIS Application, Chongqing Municipal Education Commission, Chongqing 401331, China;

3. The Three Gorges Reservoir Area Surface Processes and Remote Sensing Municipal Laboratory,

Chongqing 401331, China.)

Abstract: Having arisen as a national strategy and institution, the Major Function Zones Planning (MFZP) will play an active role in guiding and restraining China's long-term spatial development pattern. From the perspective of region uniqueness, it is critical to reveal the genesis (formation and evolution) and feedback (identification and planning) principles for MFZP. This paper takes Chongqing Municipality, a typical provincial unit in Southwest China, as an example to identify the suitable spatial pattern for MFZP by Territorial Space Development Conditions Comprehensive Evaluation (TSDCCE). Depending on perceptual observation of suitable pattern, this paper makes a dominant factors restriction hypothesis, defines the topography and urban location as the dominant factors, and then validates the correlation between dominant factors and Major Function-Oriented Zoning (MFOZ) index system. Then, based on the above analysis results, it discusses the restrictive and spatial stability mechanism originated from dominant factors for MFOZ. The results show that: (1) The spatial pattern of suitability is clear in terms of development or protection. The areas suitable for urbanization are mainly metropolitan regions and some surrounding counties, and sub-regional centers (Wanzhou and Qianjiang) also have relatively high suitability. The areas suitable for ecological protection are mainly located in the northeast and southeast of Chongqing, including Daba mountain area, Three Gorges Reservoir area and Wuling mountain area. (2) Topography and urban location factors dominate the MFOZ spatial pattern in this region. Regression analysis showed that more than 70% of the correlation between the MFOZ index and the topographic factor reached a significant level, while the correlation between the MFOZ index and urban location factor is over 40%. The significant levels (R^2) of correlation between the weighting index (topography and urban location) and MFOZ flag variables (A and B index) are more than 0.8; The geographic detector finds that the topography's restriction on MFOZ indicators and urban location factors on that are 9 and 7, respectively, which reaches 0.05 significant level and the explanatory degrees for indicators A and B are about 70% and 60%, respectively. Then combining topography factor and urban location factor, it finds that restriction is obvious and the explanatory degrees for A and B are up to about 90%. (3) The spatial stability mechanism is shown in two aspects: one is the stability transfer mechanism based on the dominant factor's restriction, which is called objective stability; the other is the local relativity index system and the internal cancellation mechanism of the algorithm, namely, subjective stability. The coordination of the two mechanisms verifies the regional adaptability and correctness of the zoning technology system.

Keywords: Major Function-Oriented Zoning (MFOZ); dominant factor's restriction; spatial stability mechanism; geographic detector; Chongqing municipality