

土地利用系统对区域可持续发展的支撑力评价： 方法与实证

李寒冰^{1,2}, 金晓斌^{1,2,3}, 吴可⁴, 韩博^{1,2}, 孙瑞^{1,2},
姜国栋⁴, 周寅康^{1,2,3}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023; 3. 江苏省土地开发整理技术工程中心, 南京 210023; 4. 山东省自然资源厅, 济南 250014)

摘要：土地利用系统作为人类与自然界交互的关键载体,在区域可持续发展过程中占据重要地位。为分析其与联合国可持续发展目标(SDGs)的关联特征,解释其对SDGs的支撑能力,构建土地利用系统内涵解析框架,探索其对SDGs的支撑机制并构建可持续发展支撑力评价体系,以山东省为例进行实证分析。研究表明:(1)以土地利用系统为核心,在人地关系视角下解析其与社会、经济、生态系统的交互作用,分析其在地人耦合系统中的运行机制,揭示其与可持续发展的相关关系,可为确定土地利用系统可持续发展目标提供理论解析。(2)山东省土地利用系统支撑力呈“省域西低东高、市域中心低周围高”分布,研究期内,66%的区域实现了支撑能力的提升,支撑力变化呈现“西北部提升、中部及东部下降”现象。具有农业优势的西部平原区对SDGs的直接支撑及自身稳定力提升,但间接支撑力有所下降,东部经济发达区自身稳定力有所提高,但直接及间接支撑力下降。(3)各类型支撑力变化空间相关性显著。显著区域多分布在市辖区,菏泽市农业发展能力的辐射带动作用较强,东营市土地经济产出及社会供应能力呈高一高集聚,土地自身稳定力呈低一低集聚。研究提出了土地利用系统支撑可持续发展的新视角,可为后续研究提供借鉴,实证分析为山东省可持续发展战略提供决策建议,为国土空间规划背景下的政策调控提供参考。

关键词：土地利用系统;可持续发展;土地支撑力;山东省

可持续发展作为全球重大使命,强调人类与地球各系统的和谐永续共存。从联合国千年发展目标(MDGs)到2030年可持续发展目标(SDGs),可持续问题备受各界重视。SDGs的实现有赖于社会、生态、自然资源等各要素协调统一^[1,2],但当前存在的诸多资源环境问题使可持续发展目标的实现面临严峻挑战^[3,4]。土地资源作为支撑可持续发展的基础要素之一,是人类系统、生物圈、大气圈及其他系统相互作用的重要媒介,作为维持人类生计和福祉的基础性要素,可提供物质、能源、生态等多种服务^[5,6]。当土地资源从单纯的自然要素转变为劳动资料及劳动对象时,在人类活动影响下,土地资源本底、土地利用方式及强度与社会经济、生态环境的物质交流循环构成了土地利用系统^[7]。土地利用系统与社会、生态系统之间的交互机制决定了其在解决食物、能源、健康等可

收稿日期: 2020-07-03; 修订日期: 2020-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971234, 41971235)

作者简介: 李寒冰(1996-),女,河南商丘人,博士研究生,主要从事土地资源可持续利用研究。

E-mail: 897921736@qq.com

通讯作者: 金晓斌(1974-),男,甘肃兰州人,博士,教授,博士生导师,主要从事土地利用与规划研究。

E-mail: jinxb@nju.edu.cn

持续发展重大问题中扮演的关键角色^[8-12], 同时土地利用变化也显著影响社会、经济和生态系统的稳定性与稳定性^[13]。在全球层面, 不断增长的人口和资源能源消耗导致土地压力过大, 不当的土地利用方式及利用强度对社会发展和陆地生态系统造成了严重的负面影响, 其中, 近1/4的土地退化由人为造成^[5], 引起的极端天气导致低纬度地区粮食安全性降低^[14]、作物产量下降^[15]、非洲畜牧业发展增长缓慢^[16]等不良现象; 在区域层面, 资源密集型消费和经济快速发展导致的土地问题影响了人类健康^[14,17]、生物多样性^[18]、粮食安全^[19]等诸多方面, 如干旱的土壤增加热浪的严重性^[20]、荒漠化加剧全球变暖^[21]、城市化进程加剧城市热岛效应^[22,23]等。社会、生态、经济各系统对土地造成的压力也会造成土地利用方式的转变^[24,25]。在人口增长与社会发展的双重压力下, 合理利用土地有助于减少其对社会和生态系统的负面影响。在土地资源本底确定的情况下, 如何改造土地、利用土地、平衡人地关系, 为区域可持续发展提供更有力的支撑已成为区域可持续发展中亟待解决的重点问题。

区域可持续发展及土地可持续性利用是当前学术界研究的热点领域。在理论研究层面, 学界重点关注土地利用的可持续性, 从“增长理论”到“发展理论”再到“可持续理论”, 从“追求可利用土地的数量”“追求土地发展效益”到“追求土地的再发展能力”, 如何实现土地的永续发展成为当前研究的焦点; 以系统论和复杂学为分析范式, 涉及地理学^[26]、农学^[27]、景观生态学^[28,29]、生物学^[30]、经济学^[31]、物理学^[32]等诸多领域, 亦从粮食生产^[19]、经济发展^[18]、城镇化^[33]、气候变化^[34]、生态安全^[28]等多视角分析土地利用系统与可持续发展的内在交互关系; 多以土地利用的可持续性为出发点, 剖析土地可持续的内涵, 解析土地利用方式及强度的可持续性。在研究方法层面, 多关注对土地利用可持续性的评价, 以空间分析、实证主义和追溯学为主, 包括AHP层次法、模糊评价法、主成分分析、关联矩阵等方法^[35-37]; 研究尺度虽涉及全球、国家、省、市等不同层次^[38,39], 但多集中在市县等中小尺度的实证分析^[36,40], 较少考虑区域可持续的空间相关性。

综合而言, 现有研究在土地可持续利用与土地利用多功能等方面进行了有益探索, 但较少在省域尺度从土地利用系统角度探究其与SDGs的支撑关系。山东省作为我国人口大省和农业大省, 拥有东部半岛经济发达区、中部山区中度发达区及西部平原欠发达区, 虽区位优势明显, 但内部经济差异显著、自然地理要素多元、区域发展不平衡问题凸显^[40]。本文拟从人地关系的角度解析土地利用系统的内涵与本质, 分析其对以人类为行为主体的社会、经济、生态等系统的交互关系, 以及对区域可持续发展的支撑作用, 通过实证分析省域土地利用系统支撑能力的分布特征及空间相关关系。研究可拓宽土地利用系统与可持续发展的理论研究视角, 为可持续发展目标下的省域土地均衡发展提供决策支持。

1 土地利用系统对可持续发展的支撑机制

1.1 土地利用系统内涵解析

从系统论的角度出发, 土地利用系统以土地资源本底为运行基础, 以人类为主体和实施者^[41], 以不同利用方式与利用强度为运行核心, 系统内各要素间存在协同和相干效应^[42], 系统外与以人类为主导对象的社会、生态、经济各子系统相互作用, 是持续进行物质互馈、能量流动和信息交换的多元开放系统^[43]; 从人地关系的角度出发, 人地关系

强调人类主体与自然环境间的关系。土地利用系统作为人类社会经济活动与土地资源相互作用形成的复杂系统,以其资源要素供给能力支撑各项人类活动、服务社会经济发展,同时承载人类发展多种需求及人类活动增强带来的压力,强调人地关系中“地”对“人”的支撑力、“人”对“地”的压力及两者互相作用。作为人—地复合关系下的“要素—结构—格局—服务”综合系统,土地利用系统在要素层包含以土地资源本底为基础的水资源、大气、生物环境等各类自然要素。要素间不同组合方式形成了土地利用结构,不同土地利用单元之间的空间关系和响应过程构成了土地利用格局,服务层作为土地利用系统与人类交互的关键载体,是要素、结构和格局的重要表现形式^[44],同时人类对服务的需求将施压于土地利用系统各要素。从人地耦合系统的角度出发,人类与自然环境两主体之间、主体各要素之间、要素不同组合方式下相互作用形成了人地耦合系统,囊括“人”和“地”交互过程中涉及的所有要素与作用方式,包括社会、经济、生态、土地利用等各类子系统。土地利用作为人地耦合系统中的重要组成部分,是系统运行的主要承载形式和重要运行基础,与社会、经济、生态等子系统互馈运行,是包括资源要素、组织结构、过程格局、供给服务在内的开放循环巨系统(图1)。

土地利用系统具有内部要素多元化、利用过程多样性,与社会、经济、生态系统交互关系复杂性等特征。区别于土地可持续利用与土地利用多功能研究(表1),土地可持续利用强调在保持自身持续发展的前提下可达到效益最大化的能力,属于土地利用系统中的要素、格局与服务层;土地利用多功能强调土地可提供各类产品或服务的能力,归属土地利用系统中的要素与服务层。土地利用系统具有研究对象的综合性和研究内容的系统性,强调内部各要素间及与社会、生态、经济等各系统间的相互作用关系^[41]。

1.2 土地利用系统运行机制解析

自然资源要素作为土地利用系统的基础,接受光、温、水等自然要素和各类生产资料的持续输入,最早以基础农产品产出维持人类生计,随着人类需求增大,经济输入持续增强,以不同土地利用方式和利用强度推动经济产出^[47,48]。在人口增长的压力下,土地一方面通过直接经济产出促进经济增长和社会发展,另一方面以非经济产出的方式为人类提供生态服务,以维持社会、经济、生态各子系统动态平衡。同时,土地利用系统的持续产出也反作用于系统运行,产生物质、能量和信息循环。随着人口持续增长,高数量、高质量的产出需求迫使土地接收高密度、高强度的生产资料投入,人类在土地利用系统与其他各系统交互中占据的主导作用日益突出^[49]。在不当地土地利用方式和利用强度尚处在土地自我修复能力范围内时,土地利用系统仍可保持稳定;当压力超出土地自身所能承载的阈值,将会对自系统及社会、经济、生态等他系统产生负反馈。不当的土地

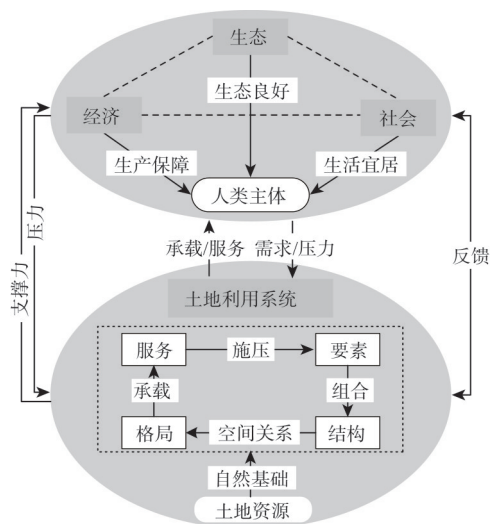


图1 人地耦合系统与土地利用系统的关系解释

Fig. 1 The relationship between the human-land coupling system and the land use system

表1 土地利用系统内涵辨析
Table 1 Analysis of the connotation of land use system

类型	土地可持续利用 ^[28,32]	土地利用多功能 ^[45,46]	土地利用系统 ^[47-49]
研究对象	不同土地利用方式与强度形成的土地利用效率	不同土地利用方式与强度提供的各类产品或服务	以人类为行为主体的土地与经济、社会、生态交互循环复合系统
研究需求	解析土地利用可持续性，服务土地利用决策	解析土地利用的功能属性，指导土地利用宏观布局及空间发展战略	解析系统运行机制及与人类活动的互馈关系，服务人地关系协调发展
研究内容	土地利用维持动态平衡和持续发展的能力，即在保持自身稳定的前提下可达到效益最大化的能力	土地利用产生环境、经济和社会功能的状态和表现，提供各类产品或服务的能力	包含土地资源特性、功能属性、利用方式与强度等在内的人地相互作用关系
评价思路	评估土地可持续利用水平，寻求土地资源可持续发展方式	依据土地利用主导用途方向，促进土地利用功能协调	以土地利用系统内涵解析为基础，解析系统内部运行机制及对入地耦合巨系统的支撑作用
异同点	强调土地集约化及高效利用，归属于土地利用系统的要素、格局与服务层	强调土地提供的各项产品与服务，归属于土地利用系统的要素及服务层	强调入地耦合系统下土地利用发挥的作用及对人类主体的支撑能力，归属于入地耦合系统的运行基础及支撑体系

利用将导致土地生产力降低，社会系统运行紊乱，社会对土地的竞争和对资源的争夺也将持续增大，同时会引发大气污染^[50]、水土流失^[51]、土壤污染^[52]、土壤侵蚀^[53]等生态环境问题。

土地利用与可持续发展目标（SDGs）密切相关^[54]（图2），SDGs的实现需依托土地生产力、稳定力、人口承载等各项功能，以推进经济社会发展和生态安全。SDG1（无贫穷）的实现需依赖工矿仓储、商业服务等用地^[55]；SDG2（零饥饿）的实现需依赖可生产食物的耕地^[56]；SDG3（健康与福祉）、SDG4（优质教育）的实现则依托土地资源开展医疗、教育等公共设施和基础服务的建设^[57]；SDG8（工作与经济）、SDG11（可持续住区）和SDG12（消费与生产）的实现需依托建设用地带来的经济产出^[58]；土地利用的稳定性与资源环境的协调性为SDG13（气候行动）和SDG15（陆生生物）提供支撑^[59,60]。土地利用系统以其生产功能进行经济产出，带动经济发展，协调生产关系，支撑区域生产可持续；以社会功能承载人口增长，提供公共设施、住宅、交通等各项服务，维持社会稳定发展；以生态功能支撑资源环境协调发展，促进生态安全与平衡。

1.3 土地利用系统对可持续发展的支撑力解析

基于土地利用运行机制及对SDGs的支撑关系，本文从土地生产性、土地稳定性、人口承载性、经济可行性、资源环境协调性和社会可接受性六个方面构建土地利用系统对区域可持续发展支撑力评价体系（表2）。由于土地利用系统更突出除自然本底之外的土地利用方式和利用强度，故评价指标体系重点关注土地利用过程，不涉及土地资源的自然属性（如坡度、高程、降水等）。《2030年可持续发展议程》包括17个可持续发展目标和169个具体目标^[1]。为进一步揭示土地利用系统对可持续发展目标的支撑能力，在分析准则层表征意义的基础上，解释指标层对SDG具体目标的支撑作用：

（1）生产性作为土地支撑可持续发展的基础条件，以土地生产性表征土地在不同利用方式和强度下的生产能力。以耕地规模和粮食产量反映土地对全面消除饥饿、粮食安

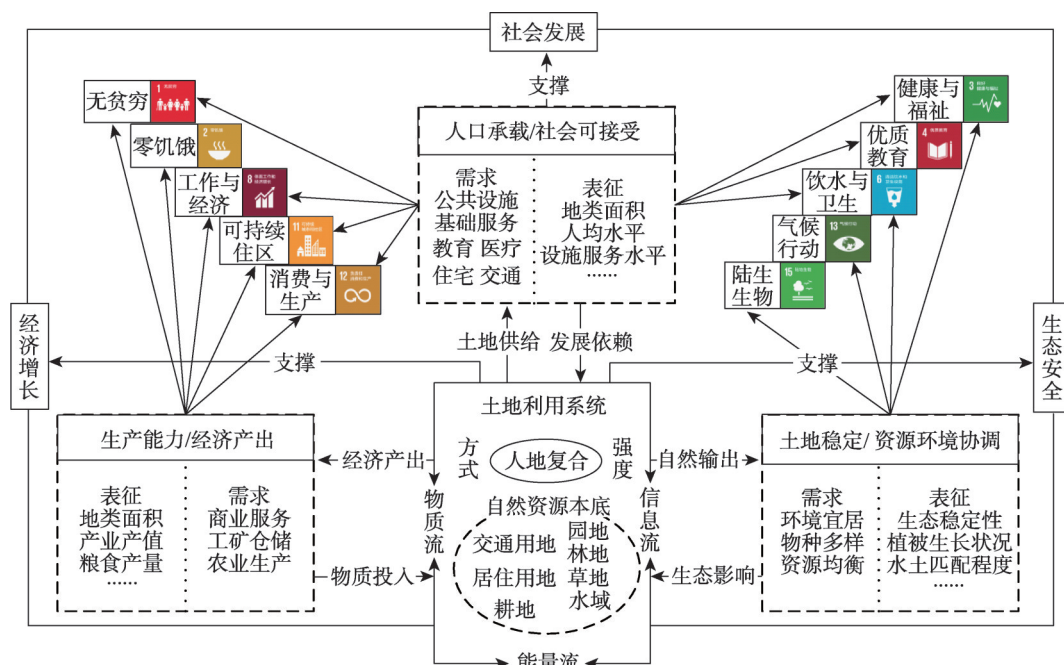


图2 土地利用系统运行机制解析框架

Fig. 2 Analysis of the operational mechanism of the land use system

全的保障作用，可对SDG2.1（消除饥饿）和SDG2.2（提供营养）提供支撑作用^[62]；以设施农用地面积和第一产业增加值反映农业生产力，可对SDG2.3（提高农业收入）提供支撑作用^[63]。

（2）土地系统稳定作为可持续发展的必要条件，以土地稳定性表征土地利用过程中受损之后的自愈能力、安全性和风险抵御能力。以耕作可达性和有效灌溉面积占比反映土地管理措施对提升土地抗灾能力、维持农业生态系统的保障性，可对SDG2.4（维护农业可持续）提供支撑^[64]；以水面面积占比和土地退化指数衡量水土资源协调性及土地荒漠化程度，以支撑SDG6.1（保护水环境）和SDG15.3（防治荒漠化）^[65,66]。

（3）人口作为可持续发展的核心参与者，以人口承载性表征土地利用对人口增长的供应及承载能力。以人均耕地面积和人均粮食产量表征土地对人口的直接保障，可对SDG2.1和SDG2.2提供支撑作用^[56]；以人均建设用地面积反映土地提供的住房保障，可支撑SDG11.1（确保住房和基本服务），以人口密度反映区域整体人口压力^[58]。

（4）土地的经济功能是实现可持续发展的关键要素，以经济可行性表征土地利用对区域经济发展的带动作用，强调土地利用形成的直接或间接经济效益。以人均国民生产总值反映人口对土地的经济压力，可对SDG1.1（消除极端贫困）和SDG1.4（享有土地资源）提供支撑作用^[47]；以土地生产力反映土地的经济产出能力，以固定资产投资表征经济发展潜力，可对SDG8.3（发展产出）提供支撑作用^[48]。

（5）保持资源环境协调作为可持续发展的前提，以资源环境协调性表征土地利用过程中对资源与环境的平衡情况，强调土地的合理利用和开发。以土地总面积反映土地资源本底基础，以农业机械总动力反映大气及土壤污染的可能性，实现可持续发展应最大程度降低其对粮食安全和大气环境造成的负面影响，可支撑SDG3.9（减少空气、水和土

表2 土地利用系统对区域可持续发展支撑力评价体系

Table 2 Evaluation system of the support of land use system to regional sustainable development

目标层	准则层	指标层	计算方法及指标释义	指标性质
土地利用系统对区域可持续发展支撑力	土地生产性	耕地总面积 x_1	区域内耕地面积, 表征区域粮食生产基础	+ ^①
		粮食总产量 x_2	区域内粮食产量总和, 表征耕地生产水平	+
		设施农用地面积 x_3	农业生产建设用地, 表征区域农业生产强度	+
	土地稳定性	第一产业增加值 x_4	第一产业总产出减去中间投入, 表征第一产业生产经济效益	+
		耕作可达性 x_5	耕作易到达区域面积 ^② /耕地总面积, 表征农业生产便利性	+
		有效灌溉面积占比 x_6	有效灌溉的耕地面积 ^③ 占耕地总面积的比例, 表征耕地产出稳定性	+
		水面面积占比 x_7	水面面积/土地总面积, 表征水土资源协调程度	+/-
		土地退化指数 x_8	(土地沙化面积+盐碱化面积)/土地总面积, 表征土地生态质量	-
	人口承载性	人均耕地面积 x_9	耕地总面积/区域总人口, 表征耕地总量对区域人口的支撑性	+
		人均粮食产量 x_{10}	粮食总产量/区域总人口, 表征耕地产出对人口的直接供应	+
		人均建设用地面积 x_{11}	建设用地面积/总人口, 表征区域内建设用地对人口的直接支撑	+/-
		人口密度 x_{12}	总人口/土地总面积, 表征区域内土地对人口的支撑强度	-
	经济可行性	人均国民生产总值 x_{13}	国民生产总值/区域总人口, 表征区域经济对人口的支撑性	+
		固定资产投资 x_{14}	购置固定资产总费用, 表征区域范围内社会经济发展潜力	+
		土地生产力 x_{15}	国民生产总值/土地总面积, 表征区域范围内土地利用强度	+
	资源环境协调性	土地总面积 x_{16}	区域范围内土地面积总和, 表征区域范围内土地资源总量	+
		农业机械总动力 x_{17}	农业动力机械的动力总和, 表征农业机械排放物污染程度	-
		植被生产力 x_{18}	以区域EVI年平均值 ^④ 表征区域范围内植被生长状况	+
		单位面积林木蓄积量 x_{19}	森林面积/土地总面积, 表征区域范围内植被覆盖度	+
	社会可接受性	公路用地面积 x_{20}	区域范围内公路用地总面积, 表征公路对社会发展的支撑性	+
		城市面积 x_{21}	区域范围内城市总面积, 表征土地资源对城市发展的直接供应	+/-
		普通中学在校学生数 x_{22}	普通中学在校学生总数, 表征土地对社会教育发展的支撑	+
		医疗卫生机构床位数 x_{23}	医疗卫生机构床位总数, 表征土地对社会医疗发展的支撑	+

注：① “+”代表指标性质为正向，值越大，土地利用系统对区域可持续发展的支撑性越强；“-”代表指标性质为负向，值越大，土地支撑性越小；“+/-”代表适度指标。② 耕作可达性：以农村道路做2 km缓冲区^[61]，将其与耕地面积重叠部分定义为耕作易到达区域，将耕作易到达区域面积与耕地总面积作比值即为耕作可达性。③ 有效灌溉面积：以农村沟渠做100 m缓冲区，将其与耕地面积重叠部分定义为耕地有效灌溉面积。④ 区域EVI年平均值：基于MOD09A1数据，计算各研究单元内区域EVI年平均值。

壤污染)和SDG12.5(防治污染与减排)^[67];以植被生产力和单位面积林木蓄积量表征植被覆盖情况及生产力,反映生态系统的可持续性,可对SDG13.1(提高灾害防御能力)和SDG15.1(可持续利用生态系统及服务)提供支撑作用^[68]。

(6)可持续发展追求社会的健康、持续与稳定,以社会可接受性强调土地利用过程中社会大众的接受能力,表征社会发展对土地利用的依赖关系;以公路用地面积反映区域道路便利性,可支撑SDG11.2(提供交通运输系统)^[69];以城市面积表征城市发展的用地基础,可支撑SDG11.3(城市建设)^[68];以普通中学在校学生数反映教育发展建设用地对社会发展的支撑,以促进公平优质的教育,可支撑SDG4.1(确保教育)和SDG4.4(技术培训)^[70];以医疗卫生机构床位数反映医疗发展建设用地对社会发展的支撑,以促进全民健康,可支撑SDG3.4(疾病治疗)和SDG3.8(基本保健服务)^[71]。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

山东省是中国东部沿海的经济大省,与日韩隔海相望,地处环渤海经济圈,在“一带一路”建设、京津冀协同发展、黄河流域生态保护和高质量发展、中韩自贸协定、东亚海洋合作等各项发展战略中占据重要地位。山东省现辖17个(地)市,总面积为15.8万 km^2 ,总人口10047万人(全国第2位),GDP总量7.65万亿元(全国第4位),山东省经济综合实力较强,资源禀赋优势显著,特殊的地理位置提升了区域竞争力,但其资源供给不足,人口压力较大,生态系统脆弱,人地矛盾日益突出,虽具有较高的综合实力,但在2018年发布的《可持续发展蓝皮书:中国可持续发展评价报告》中,山东省可持续性居全国第8位,区域可持续发展能力亟待提升。本文综合考虑研究科学性 & 数据可获取性,以山东省137个县(区)作为研究单元(图3),以2012年和2018年为两个研究时间段,在省域层面分析土地利用系统对区域可持续发展的支撑能力。

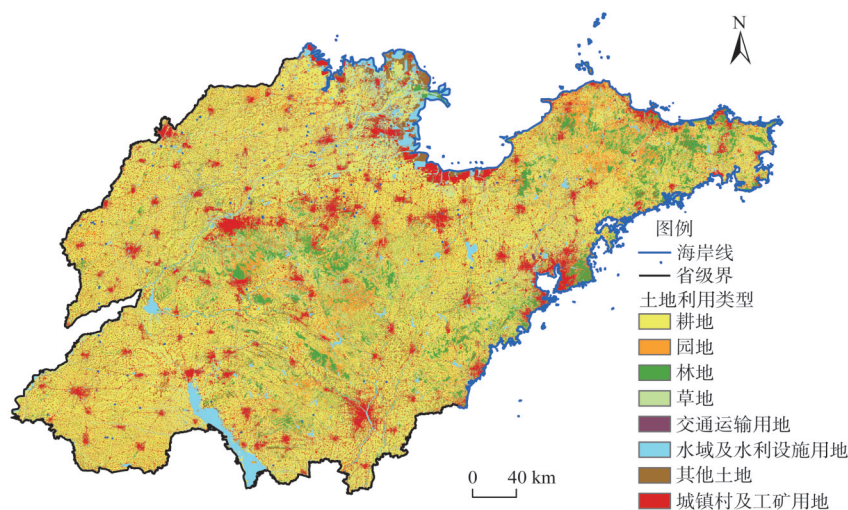


图3 研究区区位和2018年土地利用现状

Fig. 3 Schematic diagram showing the location of the study area and land use status in 2018

2.2 数据来源

研究数据包括土地利用数据、社会经济数据及相关统计数据(表3)。其中,土地利用现状数据是核心基础,为保证数据分析精度和数据可比性,选取2012年(二调数据正式使用期)和2018年(最新的二调变更数据)作为研究时间截面。

2.3 研究方法

(1) 因子分析法

因子分析法是从观测变量群中提取共性因子、获取隐形变量,并以潜在变量和影响因素的线性组合表示原始变量的统计学方法^[72]。即从复杂变量群中提取具有密切关系的变量,抽离多个综合性指标,这些综合性指标被称为公共因子。将观测变量群凝结为几个公共因子,可进行数据浓缩,达到提炼变量群本质和核心的目的,以公共因子的方差贡献率和该因子的得分乘数建立公共因子得分函数。研究借助SPSS 25.0、ArcGIS 13.0软件进行数据处理与分析。

表3 数据来源及说明

Table 3 Data source and description

数据类型	来源	选用时间	空间分辨率
土地利用数据	山东省土地利用调查数据	2012年、2018年	1 : 10000
社会经济数据	山东省统计年鉴	2013年、2019年	县级
	山东省各市统计年鉴	2013年、2019年	县级
	中国农村统计年鉴	2013年、2019年	县级
EVI (MOD09A1)	https://search.earthdata.nasa.gov	2012年、2018年	500 m

对原始数据进行整理得到原始数据矩阵，为消除量纲和数量级对研究结果的影响，采取极差变换法进行标准化和无量纲化处理，函数如下：

对于正向指标：

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{ij \min}}{X_{ij \max} - X_{ij \min}} \quad (1)$$

对于负向指标：

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij \max} - X_{ij}}{X_{ij \max} - X_{ij \min}} \quad (2)$$

对于适度指标，首先进行正向化处理：

$$Z_{ij} = \frac{1}{X_{ij} - A} \quad (3)$$

式中： A 为适度值，运用正向指标标准化方法进行标准化处理。

以主成分分析法作为提取方法进行公因子提取，由于数据已进行标准化处理，故因子旋转对数据准确性无影响。根据因子系数矩阵，生成各公因子得分，公式为：

$$W_j = \sum_{k=1}^m \alpha_{jk} x_k \quad (4)$$

式中： m 为公因子个数（个）； k 为原始变量个数（个）； α_{jk} 为因子对应得分系数； x_k 为原始变量标准化值。借助各公因子方差贡献率确定公因子权重，加权汇总得各研究地域单元的综合得分。

(2) 空间自相关分析

空间自相关是用以表达同一变量在不同地域单元的相关关系，其度量依据为要素值和要素位置，度量模式分为聚类、离散和随机模式，度量值可表达为Moran's I 指数值（莫兰指数）、 z 得分和 p 值。借助空间权重矩阵定义要素的空间依赖性，定义方式分为“邻接性”和“距离性”两大类^[41]。由于本文更侧重邻域之间的连接关系，并非强调距离变量，同时考虑地域单元之间是否存在公共边界，故选用“邻接性”中的“车式邻接（Rook邻接）”进行空间权重矩阵构建，研究借助Geoda软件进行。

采用局部莫兰指数 I 来检验空间集聚性及邻域间的相关关系，定义为：

$$I_a = \frac{(y_a - \bar{y}) \sum_{b=1}^n Q_{ab} (y_b - \bar{y})}{S_y^2} \quad (5)$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_{b=1}^n (y_b - \bar{y})^2}{n} \quad (6)$$

式中： n 为研究单元总数（个）； Q_{ab} 是空间权重矩阵元素值； y_a 是研究单元 a 的 y 变量值； y_b 是研究单元 b 的 y 变量值； \bar{y} 为 y 的均值； S_y^2 为方差。

当 I_i 为正时，表示高值被高值包围（H-H）或低值被低值包围（L-L）；当 I_i 为负时，表示高值被低值包围（H-L）或低值被高值包围（L-H），以此来表示局部空间自相关关系。研究借助莫兰指数进一步分析变量的空间集聚关系，莫兰指数取值范围为（-1, 1），当 $I>0$ 时，表示正的空间自相关，即变量具有空间聚集性；当 $I<0$ 时，表示负的空间自相关，即变量具有空间离散性；当 $I=0$ 时，表示变量的空间聚集性不显著。以支撑力总得分及得分差值作为第一变量，分析其局部空间自相关关系，以空间集聚图显示空间相关性。其中高一高值（H-H）区代表此区域土地支撑力（变化）较强，且与邻域关系密切，对周边辐射带动作用较强；低一低值（L-L）区代表此区域土地支撑力（变化）较弱，且与周边联系不够，辐射带动作用较弱；高一低值（H-L）区代表此区域虽然土地支撑力（变化）较强，但与周边联系较弱，辐射带动作用较弱；低一高值（L-H）区代表此区域虽然土地支撑力（变化）较弱，但与周边联系较强，对周边区域具有一定的影响作用。

3 结果分析

3.1 土地利用系统对可持续发展的支撑力

为确定各指标内部的相关关系并评价各研究单元土地利用系统可持续发展的支撑能力，考虑累积方差百分比为80%，提取前6个公因子作为土地利用系统支撑区域可持续发展的关键因素。

2012年公因子提取结果显示（表4）：公因子1主要贡献于耕地产出能力及区域第一产业产值；公因子2由土地经济效益指标决定，强调土地利用系统对区域经济的支撑能力；公因子3重点贡献于土地利用系统的稳定能力，强调土地生态质量；公因子4由人口密度、人均资源占有量等指标决定，强调土地利用系统对人口增长的承载能力；公因子5

表4 公因子提取结果及累计方差百分比
Table 4 Common factor extraction results

2012年					
公因子1	公因子2	公因子3	公因子4	公因子5	公因子6
耕地总面积	固定资产投资	耕作可达性	人口密度	植被生产力	水面面积占比
粮食总产量	土地生产力	有效灌溉面积	人均建设用地面积	单位面积林木蓄积量	普通中学在校学生数
设施农用地面积	城市面积	土地退化指数	人均耕地面积	公路用地面积	医疗卫生床位数
土地总面积	人均GDP	农业机械总动力	人均粮食产量		
第一产业增加值					
30.382	46.611	59.014	69.040	74.955	79.861
2018年					
公因子1	公因子2	公因子3	公因子4	公因子5	公因子6
耕地总面积	人均GDP	水面面积占比	人口密度	人均建设用地面积	设施农用地面积
粮食总产量	固定资产投资	土地退化指数	土地生产力	单位面积林木蓄积量	农业机械总动力
人均耕地面积	公路用地面积	植被生产力	第一产业增加值	普通中学在校学生数	耕作可达性
土地总面积	城市面积		人均粮食产量	医疗卫生床位数	有效灌溉面积
30.492	47.011	58.657	68.483	75.644	80.780

由林地数量和植被指数决定, 强调资源环境的协调性; 公因子6多由反映社会发展的指标决定, 强调土地利用系统对社会发展的支撑能力。基于此, 将2012年的公因子1和公因子4定义为土地利用系统对区域可持续发展的直接支撑力, 将公因子2和公因子6定义为土地利用系统对区域可持续发展的间接支撑力, 公因子3和公因子5定义为土地利用系统的自身稳定力。同理, 将2018年的公因子2和公因子5定义为土地利用系统的直接支撑力, 公因子1和公因子6定义为土地利用系统的间接支撑力, 公因子3和公因子4定义为土地利用系统的自身稳定力。对同属直接支撑力、间接支撑力和自身稳定力的各项指标进行对比, 不同年份公因子包含的具体指标虽存在一定差异, 但74%的指标在不同年份仍归属同一支撑力类别, 选取78%的公共指标作为支撑力对比依据。

将6个公因子的方差百分比作为计算土地利用系统支撑能力的权重, 得到土地利用系统的支撑力计算结果(图4), 支撑力水平具有明显的空间差异性。在省域层面呈现“西低东高”的分布特征, 支撑力水平较高的区域分布在青岛市、潍坊市东部、东营市等地, 支撑力较低的区域零散分布在中部山区及西部平原区, 土地资源支撑区域可持续发展的实现面临一定挑战。在市域层面呈现“中心低、周围高”的分布特征, 相比于青岛市全域, 青岛市辖区的支撑力略显降低, 可看出市辖区可持续发展对土地利用系统的压力略高于青岛市其他区域, 而济南市、淄博市等同具有此类现象。相比于2012年, 2018年有66%的县(区)总支撑力得到提升, 提升区域主要集中在山东省西北部, 下降区域分布在中部山区、青岛市、烟台市等区域, 其中青岛市土地利用系统支撑力虽整体较高, 但研究期内总支撑力水平呈下降现象, 提取归属同一类别支撑力的公共因子进行加权汇总, 得到土地利用系统对可持续发展的直接支撑力、间接支撑力和自身稳定力综合得分。

将直接支撑力评价各指标结果按自然断点法划分六个等级(图5), 结果显示: 76.6%的区域直接支撑力有所提升, 提升区域主要集中在山东省西部和北部, 下降区域主要集中在东部片区。其中, 74%的县(区)域耕地规模有所下降, 各研究单元平均减少0.75万亩, 耕地规模增加的区域零星分布于青岛市、东营市和菏泽市东明县; 61%的县(区)域粮食总产量降低, 由西北部至东南部呈“阶梯递减”状态, 耕地规模和粮食产量的减少将对SDG2的实现造成一定阻碍; 研究区土地总面积整体波动较小, 青岛市黄岛区土地利用扩张明显; 第一产业增加值整体提升, 且提升幅度较大; 76%的县(区)域人口密度增大, 73%的区域人均耕地面积减少, 63%的区域人均粮食产量降低, 表明人口增长对土地的直接压力显著增大, 区域土地利用系统对SDGs的直接支撑力有待提升。

将间接支撑力评价各指标结果按自然断点法划分六个等级(图6), 结果显示:

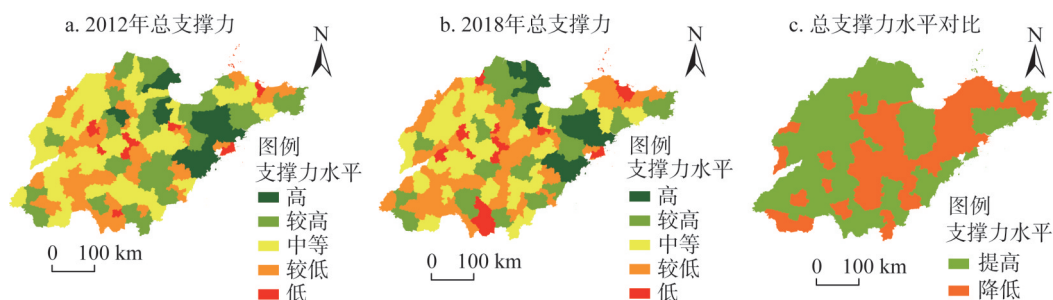


图4 2012年和2018年支撑力水平及对比

Fig. 4 Support level and comparison between 2012 and 2018

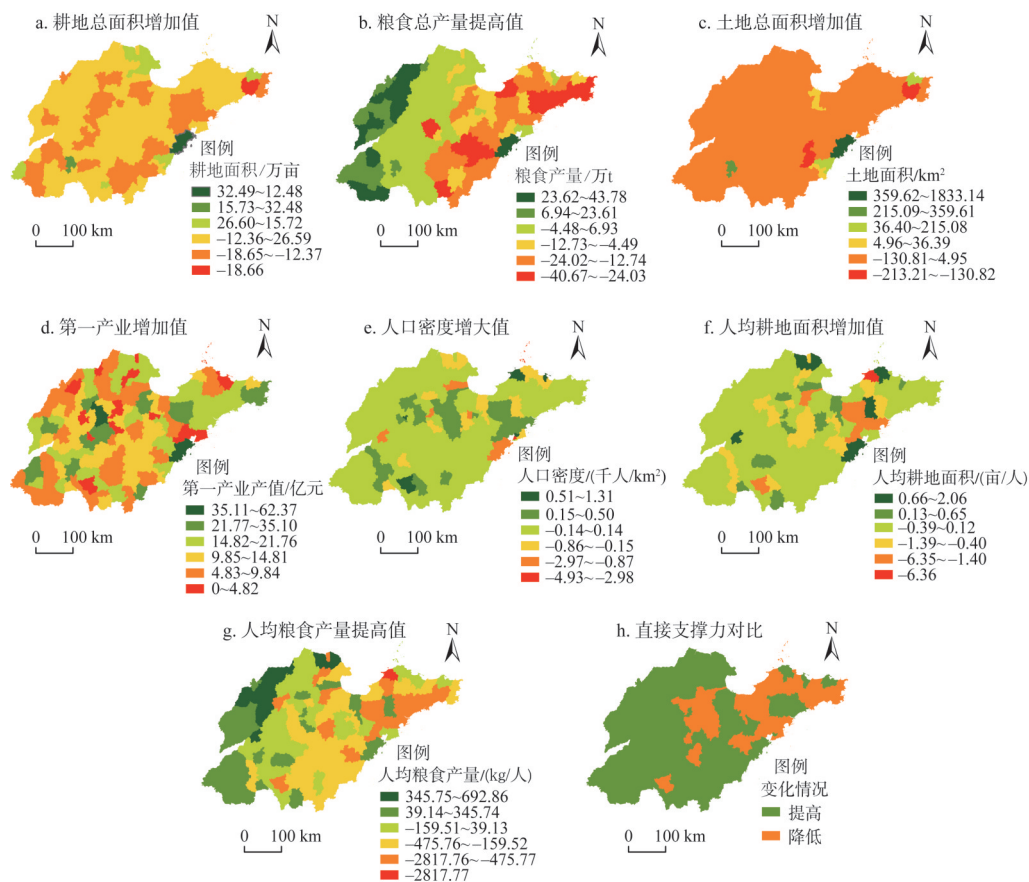


图5 直接支撑力各要素及总值对比评价结果

Fig. 5 Comparative evaluation results of each element and total value of direct support

50.3%的区域间接支撑力有所提升,提升区域集中在鲁北平原,下降区域主要分布在研究区北部及西南部部分区域。其中,研究区固定资产投资整体增加,各研究单元增长均值为257.1亿元;区域城市面积整体增加,城市扩张现象较为明显;实现人均GDP增长、普通中学在校学生数增加和医疗卫生床位数增加的区域占比分别为74%、23%和63%。土地利用带来经济增长的区域将有效推进SDG1和SDG8的实现,教育、医疗等公共服务的增加将促进SDG3和SDG4的实现。

将自身稳定力评价各指标结果按自然断点法划分六个等级(图7),结果显示:70.8%的区域自身稳定力有所提升,提升区域集中在中部、东部、南部的大部分区域,下降区域集中在北部片区,呈条带状分布。其中,85%的区域耕地可达性提高,但区域有效灌溉面积整体增加不明显,表明耕地对现有设施条件利用效率不高;土地退化指数降低,沙化、盐碱化土地减少,表明研究区土地质量整体提升,将推动SDG6和SDG15的实现;42%的区域农业机械化水平实现提高,分布在临沂市南部、日照市南部、济南市、东营市等地;42%的区域植被生产力有所提升,主要分布在区域中部、胶东半岛等林地密集区域,将支撑SDG13和SDG15的实现;区域内单位面积林木蓄积量变化不明显。

3.2 土地利用系统支撑力空间集聚特征

为明晰土地利用系统对区域可持续发展的支撑能力在空间上的分布特征及其对邻域

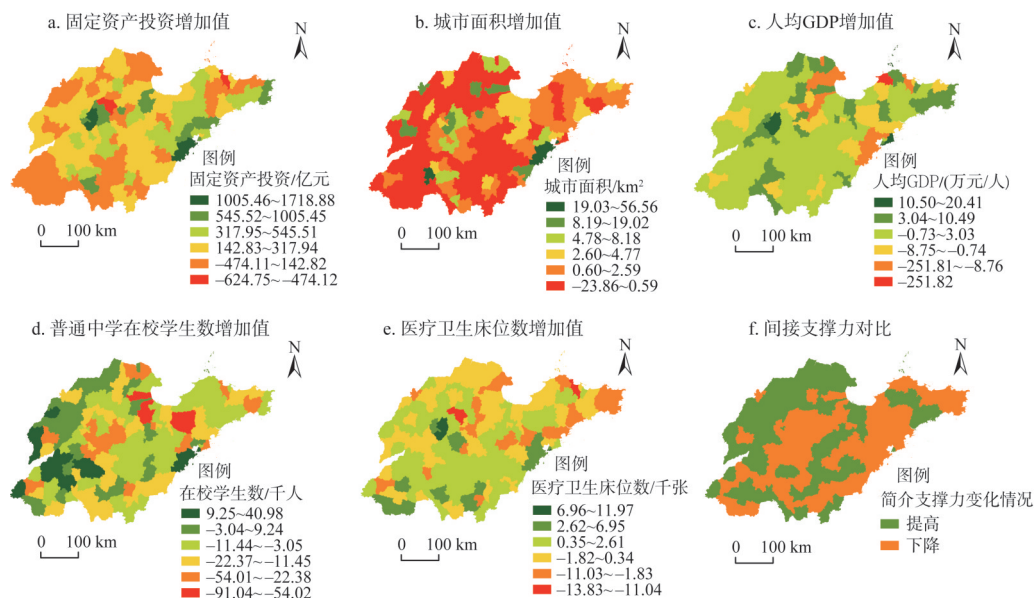


图6 间接支撑力各要素及总值对比评价结果

Fig. 6 Comparative evaluation results of each element and total value of indirect support capacity

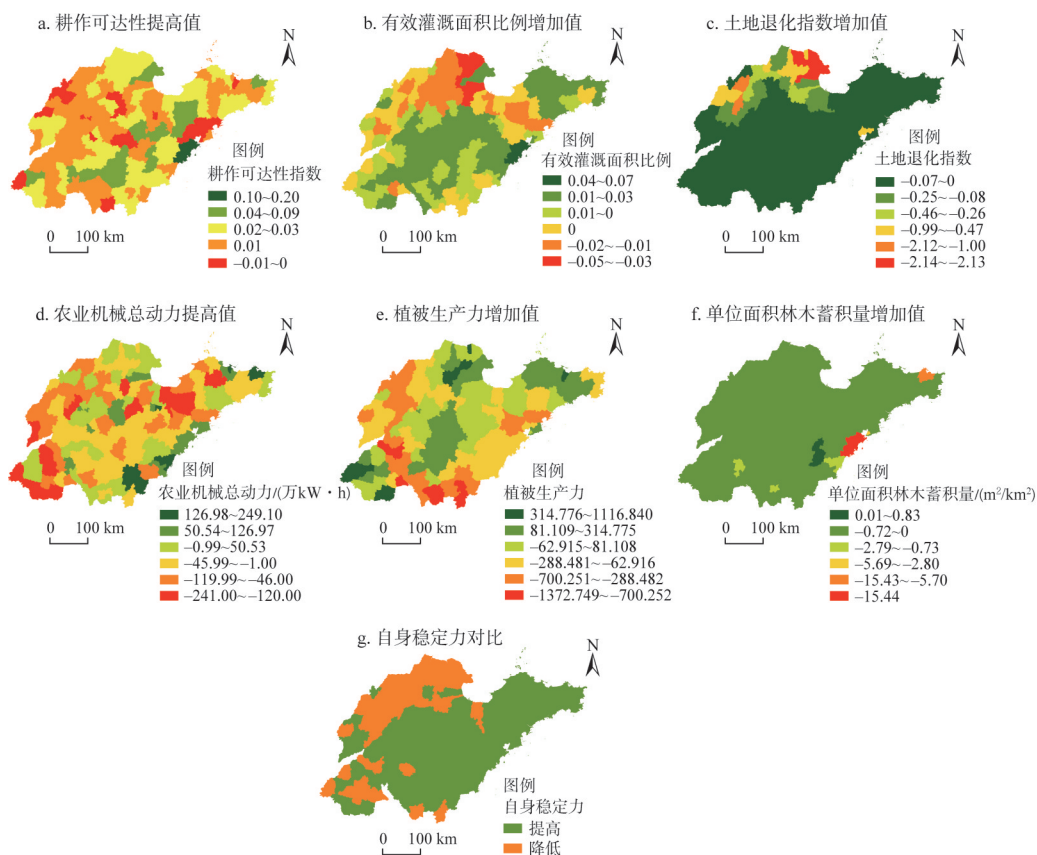


图7 自身稳定力各要素及总值对比评价结果

Fig. 7 Comparative evaluation results of each factor and total value of the capacity to maintain stability

的影响程度,对两期土地利用系统支撑力的差值做空间自相关分析,各类型支撑力及总支撑力均通过显著性检验(图8),空间集聚性分布较分散(图9)。其中,直接支撑力提升值全局 Moran's I 指数为0.4024、 z 值为4.0378、 p 值为0.001,空间正相关性较显著,高一高集聚区分布在东营市垦利区、日照市东港区等市辖区及菏泽市鄄城县、东明县等农业发达区域,表明农业优势区域的直接支撑力提升较大且对周边具有显著带动作用,区域及其周边 SDG1 和 SDG2 的实现具有良好的土地基础,

间接支撑力提升值全局 Moran's I 指数为0.4879、 z 值为4.6481、 p 值为0.001,空间正相关性较显著,高一高集聚区集中在东营市市辖区,表明东营市市辖区土地利用系统间接支撑力提升较高且对周边的带动性较强,这对市域及省域 SDG1、SDG3、SDG4 和 SDG11 的实现具有积极作用;低—低集聚区大多分布在淄博市市辖区,高一低集聚区为青岛市崂山区,低—高集聚区分布在菏泽市鄄城县和东明县、临沂市郯城县和费县等区域,表明经济发展带来的间接支撑力提升区域多集中在市辖区,但其对周边县域的辐射作用不尽相同。

自身稳定力提升值全局 Moran's I 指数为0.5932、 z 值为5.5388、 p 值为0.001,空间正相关性较显著,高一高集聚区分布在济南市历城区及历下区、淄博市临淄区和周村区、日照市东港区,表明在土地稳定、生态平衡方面提升较大且带动作用较强,对 SDG2、SDG3、SDG12、SDG13、SDG15 等具有推动作用,低—低集聚区集中分布在东营市市辖区,表明区域自身稳定力降低且区域带动作用不显著。

总支撑力差值全局 Moran's I 指数为0.2823、 z 值为2.7194、 p 值为0.008,空间正相关

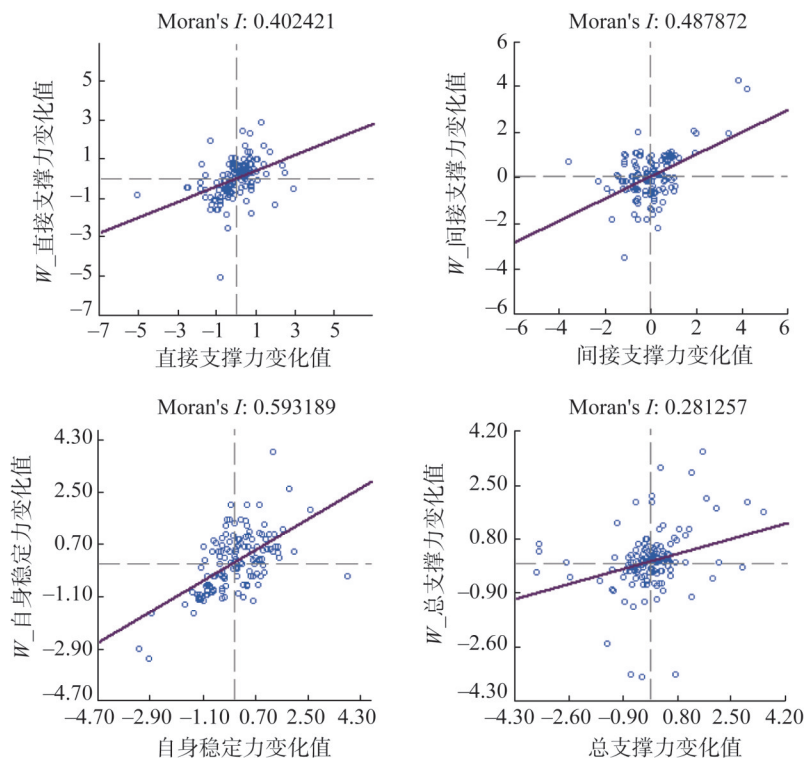


图8 土地利用系统各类型及总支撑力变化Moran's I 指数散点图

Fig. 8 Moran scatter map of changes in various types and total support capacity of land use system

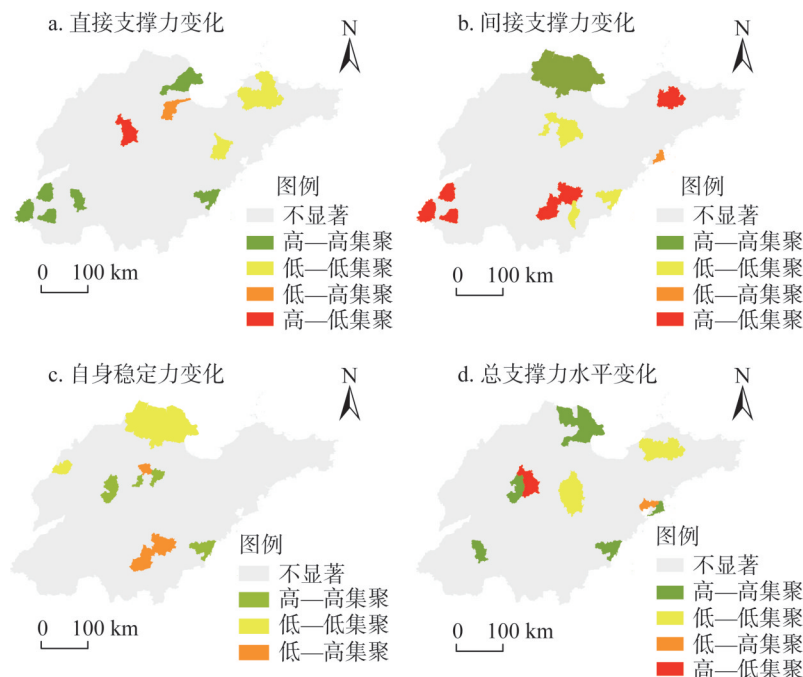


图9 土地利用系统各类型及总支撑力变化集聚图

Fig. 9 Aggregation diagram of changes in various types and total support capacity of land use system

性显著，高一高集聚区分布在济南市历城区及东营市部分县域，低—低集聚区分布在济南市章丘区。从市域层面来看，高一高集聚区多分布在市辖区，表明市辖区的空间集聚性较强；从省域层面看，省会济南市对周边市县的带动作用不明显。

4 结论与讨论

4.1 结论

在土地自然本底确定的基础上，合理的土地利用方式与强度已成为支撑区域可持续发展的关键所在。本文在已有研究的基础上，构建了土地利用系统运行机制理论解析体系，解析其运行机制及与社会、经济、生态系统的交互过程，确定了土地利用系统可支撑的SDGs，依据理论解析框架选取代表性指标开展省域尺度土地利用系统支撑力评价，提出了以土地利用为出发点的研究新视角，为土地利用系统支撑可持续发展拓宽了新的研究范畴，可为后续相关研究提供借鉴参考；以山东省为例的实证分析证实了理论框架和指标体系的可行性和科学性，不同土地利用系统对SDGs支撑能力的差异性和空间相关性反映了省域及市域可持续发展不同的侧重点，为区域发展决策调控提供参考和支撑。研究结果表明：

(1) 山东省土地利用系统支撑能力空间分布差异显著，呈“省域西低东高、市域中心低周围高”的分布特征，高支撑力区域集中在胶东半岛、东营市等东部经济发达区，中部山区及西部平原区对SDGs的支撑水平相对较低，支撑力变化呈现“西北部提升、中部及东部下降”现象。经济发达地区依赖地形、气候、区位等各项资源优势，现阶段对SDGs的支撑力较强，但研究期内支撑力有所下降，未来应关注资源高效配置及节约

集约利用。中部山区受地理条件限制,土地资源利用效率有待提高,鲁西平原区囿于传统农业发展方式与自然资源条件,整体支撑力相对较低,但研究期内呈提升态势,表明平原区对SDGs的支撑潜力较大。

(2)各类型支撑因素在空间上具有较大差异。研究期内,具有农业优势的西部平原区对SDGs的直接支撑及自身稳定力提升,但间接支撑力有所下降,在保证生产力、供给人口的基础上,应提升对区域经济的带动作用。东部经济发达区自身稳定力有所提高,但直接及间接支撑力下降,未来在追求经济增长的过程中应注重对人口的直接供给,提升区域发展可持续性。整体来看,作为农业大省和人口大省,山东省对区域SDGs的直接支撑能力较强,可支撑SDG1、SDG2、SDG11的实现,但在土地间接支撑力及自身稳定力方面应更注重经济集约发展及生态保护修复,以支撑SDG8、SDG12、SDG13的实现。

(3)各类型支撑力变化空间相关性显著。菏泽市农业发展能力的辐射带动作用较强,未来应扩大农业产出能力,提高对区域社会经济的支撑能力;东营市土地经济产出及社会供应能力呈高一高集聚,土地自身稳定力呈低一低集聚,未来应改善土地利用方式以增强土地稳定性,促进区域可持续发展;胶东半岛虽区域支撑力变化显著,但空间相关性不显著。整体来看,空间相关性显著的区域多分布在市辖区,反映在市域尺度,市辖区土地利用对周边区域的影响较大,在发挥带动作用的同时应关注市辖区土地压力的缓解。省会济南市的土地支撑力变化空间相关性不显著,对周边城市的带动作用不明显,省会城市的影响力和首位度有待进一步提升。未来可依据省域及市域的空间相关性突出不同层级可持续发展政策制定的侧重点:省域层面应侧重支撑力较强区域对周边区域的带动作用,市域层面应提高土地利用的辐射带动作用,强化市中心周边区域的疏导功能;建议注重生态保护与修复,采取减少森林砍伐和退化、改善农田管理方式、开发生物质能及其他可持续发展方案,以发挥资源优势 and 生态潜力,促进全域SDGs的实现。

4.2 讨论

可持续发展作为人类的必然选择,既要保证人类生计、社会繁荣稳定,也要使经济建设与资源环境相协调,以促进全球福祉。土地利用系统以自身与经济、社会、生态等系统交互的复杂性,以其不可再生的唯一性,决定了其与可持续发展的密切关系和在区域可持续发展需求中的核心地位。通过与土地利用集约化及可持续利用^[28,32]、土地利用功能评价^[46,48]等研究的对比,本文在评价体系层面涵盖生产性、稳定性、人口承载等土地可持续性特征及社会、经济、生态等各项功能,侧重人类主体对土地资源的依赖性,即土地利用对人类社会经济可持续发展的支撑能力。SDGs与土地利用系统关系密切,且各项SDGs之间仍存在交互作用,评价土地利用系统对SDGs整体实现的支撑作用仍需深入探讨。从实证分析来看,不同区域土地利用系统对SDGs支撑能力的差异性和空间相关性反映了省域及市域可持续发展方向的不同侧重点,在空间上,区域可持续转化为全域可持续则是实现土地利用系统支撑SDGs的终极目标。鉴于土地利用系统的开放性和复杂性,不同研究视角决定了系统对SDGs贡献的不同价值,SDGs的相互关联性也决定了土地支撑因素的广泛性,全方位揭示土地与可持续发展的耦合机制将是下一步研究重点。

本文在土地利用系统运行机制理论解析、与SDGs的支撑关系、省域尺度土地支撑力评价等方面进行了尝试性探索,但也存在以下不足:一是土地利用系统与外部系统的交互具有广泛性与复杂性,使得理论框架构建过程中难以囊括所有系统运行过程及耦合要素;二是鉴于数据可获取性,指标体系未能诠释土地利用系统对可持续发展的全部支

撑要素,有待进一步深化研究;三是本文在案例分析中重点关注对现阶段及短期区域可持续发展的支撑能力,对未来土地利用的情景预测仍有待加强。以上不足将在后续研究中完善和深入。

参考文献(References):

- [1] UNITED NATIONS. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. New York, 2015, <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>.
- [2] BRYAN B A, GAO L, YE Y, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency. *Nature*, 2018, 559(7713): 193-204.
- [3] VERBURG P H, ERB K H, MERTZ O, et al. Land system science: Between global challenges and local realities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 433-437.
- [4] GAO L, BRYAN B A. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability. *Nature*, 2017, 544(7649): 217.
- [5] IPCC. Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, 2019, <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policy-makers/>.
- [6] 陆大道, 樊杰. 区域可持续发展研究的兴起与作用. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 290-300. [LU D D, FAN J. The rise and effects of regional sustainable development studies in China. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2012, 27(3): 290-300.]
- [7] 牛星. 土地利用系统演化分析与调控管理. 上海: 上海交通大学出版社, 2012. [NIU X. Study on System Evolution and Control Regulation of Land Use. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2012.]
- [8] BENITES-LAZARO L L, GIATTI L L, SOUSA JUNIOR W C, et al. Land-water-food nexus of biofuels: Discourse and policy debates in Brazil. *Environmental Development*, 2020: 100491, Doi: 10.1016/j.envdev.2019.100491.
- [9] KEOVILIGNAVONG O, SUHARDIMAN D. Linking land tenure security with food security: Unpacking farm households' perceptions and strategies in the rural uplands of Laos. *Land Use Policy*, 2020, 90: 104260, Doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104260.
- [10] AMIGUES J, MOREAUX M. Competing land uses and fossil fuel, and optimal energy conversion rates during the transition toward a green economy under a pollution stock constraint. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2019, 97: 92-115.
- [11] GUAN S, HAN M, WU X, et al. Exploring energy-water-land nexus in national supply chains: China 2012. *Energy*, 2019, 185: 1225-1234.
- [12] RABES A, SECONDA L, LANGEVIN B, et al. Greenhouse gas emissions, energy demand and land use associated with omnivorous, pesco-vegetarian, vegetarian, and vegan diets accounting for farming practices. *Sustainable Production and Consumption*, 2020, 22: 138-146.
- [13] VANG R L, BRENDAN C, ADRIAN M, et al. Social-ecological outcomes of agricultural intensification. *Nature Sustainability*, 2018, 1(6): 275-282.
- [14] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险. 环境科学, 2018, 39(12): 5628-5638. [LI C F, CAO J F, LYU J S, et al. Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health. *Environmental Science*, 2018, 39(12): 5628-5638.]
- [15] GIULIANI G, MAZZETTI P, SANTORO M, et al. Knowledge generation using satellite earth observations to support sustainable development goals (SDG): A use case on land degradation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 88: 102068, Doi: 10.1016/j.jag.2020.102068.
- [16] DAS K, NONHEBEL S. A comparative study of the land required for food and cooking fuel in rural India. *Agricultural Systems*, 2019, 176: 102682, Doi: 10.1016/j.agsy.2019.102682.
- [17] 宗庆霞, 窦磊, 侯青叶, 等. 基于土地利用类型的土壤重金属区域生态风险评价: 以珠江三角洲经济区为例. 地球科学进展, 2017, 32(8): 875-884. [ZONG Q X, DOU L, HOU Q Y, et al. Regional ecological risk assessment of soil heavy metals in Pearl River Delta Economic Zone based on different land uses. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(8): 875-884.]
- [18] 刘春芳, 王伟婷, 刘立程, 等. 西北地区县域生态系统服务的供需匹配: 以甘肃古浪县为例. 自然资源学报, 2020, 35

- (9): 2177-2190. [LIU C F, WANG W T, LIU L C, et al. Supply-demand matching of county ecosystem services in North-west China: A case study of Gulang county. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2177-2190.]
- [19] WANG X, LI X B. Where are potential regions for the reallocation of wheat in the context of Chinese land fallow and food security policies? Findings from spatio-temporal changes in area and production between 1990 and 2014. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(6): 592-608.
- [20] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 面向非过程的多灾种时空网络建模: 以京津冀地区干旱热浪耦合为例. *地理研究*, 2017, 36(8): 1415-1427. [LI S S, YANG S N, LIU X F. Spatiotemporal network modeling in concurrent heat waves and droughts in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region, China. *Geographical Research*, 2017, 36(8): 1415-1427.]
- [21] 卢琦. 荒漠化对全球气候变化的响应. *中国人口·资源与环境*, 2002, 12(1): 97-100. [LU Q. Responses of desertification to global climatic change. *China Population, Resources and Environment*, 2002, 12(1): 97-100.]
- [22] 黄聚聪, 赵小锋, 唐立娜, 等. 城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征: 以厦门市为例. *生态学报*, 2012, 32(2): 622-631. [HUANG J C, ZHAO X F, TANG L N, et al. Analysis on spatiotemporal changes of urban thermal landscape pattern in the context of urbanisation: A case study of Xiamen city. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 622-631.]
- [23] 杨续超, 陈葆德, 胡可嘉. 城市化对极端高温事件影响研究进展. *地理科学进展*, 2015, 34(10): 1219-1228. [YANG X C, CHEN B D, HU K J, A review of impacts of urbanization on extreme heat events. *Progress in Geography*, 2015, 34(10): 1219-1228.]
- [24] LIU J, JIN X, XU W, et al. A new framework of land use efficiency for the coordination among food, economy and ecology in regional development. *Science of the Total Environment*, 2020, 710: 135670, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135670.
- [25] LI H, ZHANG X, ZHANG X, et al. Utilization benefit of cultivated land and land institution reforms: Economy, society and ecology. *Habitat International*, 2018, 77: 64-70.
- [26] 叶岱夫. 人地关系地域系统与可持续发展的相互作用机理初探. *地理研究*, 2001, 20(3): 52-59. [YE D F. The interactive mechanism of man-earth areal system and the sustainable development. *Geographical Research*, 2001, 20(3): 52-59.]
- [27] HONG C, JIN X, FAN Y, et al. Determining the effect of land consolidation on agricultural production using a novel assessment framework. *Land Degradation & Development*, 2020, 31: 356-371.
- [28] 张洪, 李中元, 李彦. 基于生态安全的山地城镇土地可持续利用模式研究: 以云南大理市为例. *地理研究*, 2019, 38(11): 2681-2694. [ZHANG H, LI Z Y, LI Y. Study on sustainable land use model in mountain towns based on ecological security: Taking Dali city of Yunnan province as an example. *Geographical Research*, 2019, 38(11): 2681-2694.]
- [29] SHAN W, JIN X, REN J, et al. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118126, Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118126.
- [30] 赵国松, 刘纪远, 匡文慧, 等. 1990—2010年中国土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动. *地理学报*, 2014, 69(11): 1640-1650. [ZHAO G S, LIU J Y, KUANG W H, et al. Disturbance impacts of land use change on biodiversity conservation priority areas across China during 1990-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(11): 1640-1650.]
- [31] 严长清, 孙电, 赖力, 等. 江苏省沿江产业带土地资源可持续利用的综合评价. *经济地理*, 2006, 26(s1): 183-187. [YAN C Q, SUN D, LAI L, et al. General evaluation of land resources' sustainable using in industrial zone of Jiangsu province along Yangtze River. *Economic Geography*, 2006, 26(s1): 183-187.]
- [32] 千倩. 城市可持续土地集约利用评价及预测研究. 北京: 中国地质大学, 2019. [QIAN Q. Evaluation and prediction of urban sustainable land intensive use. Beijing: China University of Geosciences, 2019.]
- [33] 崔学刚, 方创琳, 刘海猛, 等. 城镇化与生态环境耦合动态模拟理论及方法的研究进展. *地理学报*, 2019, 74(6): 1079-1096. [CUI X G, FANG C L, LIU H M, et al. Dynamic simulation of urbanization and eco-environment coupling: A review on theory, methods and applications. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1079-1096.]
- [34] 杨绪红, 金晓斌, 项晓敏, 等. 近300年中国耕地开垦导致的碳排放估算. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(3): 554-568. [YANG X H, JIN X B, XIANG X M, et al. Carbon emissions induced by farmland expansion in China during the past 300 years. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(3): 554-568.]
- [35] 汪权方, 晏群, 徐慧, 等. 基于灰色关联度的AHP权重矩阵构建方法改进及在农地评价中的应用. *地理科学进展*, 2016, 35(10): 1249-1257. [WANG Q F, YAN Q, XU H, et al. A modified analytic hierarchy process method based on grey relation analysis and its application in evaluating sustainability of agricultural land use in Zaoyang city, Hubei province. *Progress in Geography*, 2016, 35(10): 1249-1257.]
- [36] 汪洋, 代立, 周颖. 基于可持续性视角的城市土地利用模糊逻辑评价与诊断: 以武汉市为例. *中国土地科学*, 2016,

- 30(4): 61-69. [WANG Y, DAI L, ZHOU Y. Fuzzy logic evaluation and diagnosis on urban land use from the perspective of sustainability: Taking Wuhan city as an example. *China Land Sciences*, 2016, 30(4): 61-69.]
- [37] 苏晨晨, 周奥, 潘玉翠, 等. 基于 PCA 的龙口市土地可持续利用评价. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(12): 96-103. [SU C C, ZHOU A, PAN Y C, et al. Evaluation of sustainable land use on principal component analysis in Longkou city. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(12): 96-103.]
- [38] 方恺. 基于足迹家族和行星边界的主要国家环境可持续性多维评价. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1868-1875. [FANG K. Multidimensional assessment of national environmental sustainability based on footprint family and planetary boundaries. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11): 1868-1875.]
- [39] 赵兴国, 潘玉君, 丁生, 等. 中国省域土地利用可持续性评价及时空格局特征. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 196-204. [ZHAO X G, PAN Y J, DING S, et al. Evaluation of regional land use sustainability and its spatial-temporal pattern among provinces in China. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(3): 196-204.]
- [40] LIU Y S, YANG R, LONG H L, et al. Implications of land-use change in rural China: A case study of Yucheng, Shandong province. *Land Use Policy*, 2014, 40: 111-118.
- [41] 刘彦随. 区域土地利用系统优化调控的机理与模式. *资源科学*, 1999, 21(4): 63-68. [LIU Y S. Optimal regulation mechanism and models of regional land use system. *Resources Science*, 1999, 21(4): 63-68.]
- [42] 陆大道. 关于地理学的“人—地系统”理论研究. *地理研究*, 2002, 21(2): 135-145. [LU D D. Theoretical studies of man-land system as the core of geographical science. *Geographical Research*, 2002, 21(2): 135-145.]
- [43] 牛星. 区域土地利用系统演化分析与状态评价研究. 南京: 南京农业大学, 2008. [NIU X. Study on evolution development and status evaluation of regional land use system. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.]
- [44] 傅伯杰, 刘焯序. 系统认知土地资源的理论与方法. *科学通报*, 2019, 64(21): 2172-2179. [FU B J, LIU Y X. The theories and methods for systematically understanding land resource. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(21): 2172-2179.]
- [45] 刘超, 许月卿, 孙丕苓, 等. 土地利用多功能性研究进展与展望. *地理科学进展*, 2016, 35(9): 1087-1099. [LIU C, WU Y Q, SUN P L, et al. Progress and prospects of multi-functionality of land use research. *Progress in Geography*, 2016, 35(9): 1087-1099.]
- [46] 张晓琳, 金晓斌, 范业婷, 等. 1995—2015 年江苏省土地利用功能转型特征及其协调性分析. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 689-706. [ZHANG X L, JIN X B, FAN Y T, et al. Spatial-temporal characteristics and coordination status of the land use function transition in Jiangsu province from 1995 to 2015. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 689-706.]
- [47] HAN M Y, CHEN G Q, DUNFORD M. Land use balance for urban economy: A multi-scale and multi-type perspective. *Land Use Policy*, 2019, 83: 323-333.
- [48] 范业婷, 金晓斌, 项晓敏, 等. 江苏省土地利用功能变化及其空间格局特征. *地理研究*, 2019, 38(2): 383-398. [FAN Y T, JIN X B, XIANG X M, et al. Land use functions change and its spatial pattern in Jiangsu province from 2000 to 2015. *Geographical Research*, 2019, 38(2): 383-398.]
- [49] 杨宇, 李小云, 董雯, 等. 中国人地关系综合评价的理论模型与实证. *地理学报*, 2019, 74(6): 1063-1078. [YANG Y, LI X Y, DONG W, et al. Comprehensive evaluation on China's man-land relationship: Theoretical model and empirical study. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1063-1078.]
- [50] MARTHA L, MICHAEL B, PAULINA W, et al. Land use regression modelling of air pollution in high density high rise cities: A case study in Hong Kong. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 306-315.
- [51] BORRELLI P, ROBINSON D A, PANAGOS P, et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(34): 1-8.
- [52] ARTIOLA J F, WALWORTH J L, MUSIL S A, et al. Chapter 14: Soil and land pollution. Edited by BRUSSEAU M L, PEPPER I L, GERBA C P. *Environmental and Pollution Science (Third Edition)*. New York: Academic Press, 2019: 219-235.
- [53] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 2017, 8: 1-3.
- [54] BLEISCHWITZ R, SPATARU C, VANDEVEER S, et al. Resource nexus perspectives towards the United Nations Sustainable Development Goals. *Nature*, 2018, 1: 737-743.
- [55] XU J, SONG J, LI B, et al. Do settlements isolation and land use changes affect poverty? Evidence from a mountainous province of China. *Journal of Rural Studies*, 2020, 76: 163-172.

- [56] MASON-D'CROZ D, SULSER T B, WIEBE K, et al. Agricultural investments and hunger in Africa modeling potential contributions to SDG2-Zero Hunger. *World Development*, 2019, 116: 38-53.
- [57] GAO Y, TIAN L, CAO Y, et al. Supplying social infrastructure land for satisfying public needs or leasing residential land? A study of local government choices in China. *Land Use Policy*, 2019, 87: 104088, Doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104088.
- [58] 谢花林, 王伟, 姚冠荣, 等. 中国主要经济区城市工业用地效率的时空差异和收敛性分析. *地理学报*, 2015, 70(8): 1327-1338. [XIE H L, WANG W, YAO G R, et al. Spatial and temporal differences and convergence of China's main economic zones. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(8): 1327-1338.]
- [59] TIMOTHY D, SEARCHINGER, STEFAN, et al. Publisher correction: Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature*, 2019, Doi: 10.1038/s41586-018-0863-y.
- [60] NEWBOLD T, HUDSON L N, HILL S L L, et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 2015, 520(7545): 45-50.
- [62] LIU J, JIN X, XU W, et al. Influential factors and classification of cultivated land fragmentation, and implications for future land consolidation: A case study of Jiangsu province in Eastern China. *Land Use Policy*, 2019, 88: 104185, Doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104185.
- [61] 赵元, 胡月明, 张新长, 等. 农村居民点耕作距离空间分布特征估测分析. *地理科学*, 2016, 36(5): 760-765. [ZHAO Y, HU Y M, ZHANG X C, et al. Spatial pattern of farming distance in rural area using ESDA. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(5): 760-765.]
- [63] 熊利亚, 夏朝宗, 刘喜云, 等. 基于RS和GIS的土地生产力与人口承载力: 以向家坝库区为例. *地理研究*, 2004, 23(1): 10-18. [XIONG L Y, XIA C Z, LIU X Y, et al. A RS and GIS based study on land productivity and population supporting capacity: Taking Xiangjiaba Reservoir Area as an example. *Geographical Research*, 2004, 23(1): 10-18.]
- [64] 冯颖, 姚顺波, 郭亚军. 基于面板数据的有效灌溉对中国粮食单产的影响. *资源科学*, 2012, 34(9): 1734-1740. [FENG Y, YAO S B, GUO Y J. Unit area crop yield response to effective irrigation in China based on a panel data model. *Resources Science*, 2012, 34(9): 1734-1740.]
- [65] NEIL C, NICOLE N, GRACIELA I, et al. A land degradation interpretation matrix for reporting on UN SDG indicator 15.3.1 and land degradation neutrality. *Environmental Science & Policy*, 2020, 114: 1-6.
- [66] DAVID R C, RICARD G G, AGUSTI P F. Data-driven Bayesian network modelling to explore the relationships between SDG 6 and the 2030 Agenda. *Science of the Total Environment*, 2020, 710: 136014, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136014.
- [67] 徐建明, 刘杏梅. “十四五”土壤质量与食物安全前沿趋势与发展战略. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1143-1154. [XU J M, LIU X M. Frontier trends and development strategies of soil quality and food safety in the 14th Five-Year Plan. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1143-1154.]
- [68] 吴霜, 延晓冬, 张丽娟. 中国森林生态系统能值与服务功能价值的关系. *地理学报*, 2014, 69(3): 334-342. [WU S, YAN X D, ZHANG L J. The relationship between forest ecosystem emergy and forest ecosystem service value in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 334-342.]
- [69] AKURAJU V, PRADHAN P, HAASE D, et al. Relating SDG11 indicators and urban scaling: An exploratory study. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 52: 101853, Doi: 10.1016/j.scs.2019.101853.
- [70] 杨君, 何欢, 胡巧莲, 等. 基于路网密度的城市功能用地空间分布相关性研究: 以益阳市中心城区为例. *经济地理*, 2018, 38(12): 97-103. [YANG J, HE H, HU Q L, et al. Relationships between road network density and spatial distribution of urban functional land: A case study of central urban area in Yiyang city. *Economic Geography*, 2018, 38(12): 97-103.]
- [71] 刘倩, 李诚固, 申庆喜, 等. 长春市医疗设施空间格局与演变特征. *经济地理*, 2017, 37(7): 139-145. [LIU Q, LI C G, SHEN Q X, et al. Spatial evolution character of medical facilities in Changchun city. *Economic Geography*, 2017, 37(7): 139-145.]
- [72] 何晓群. 现代统计分析方法与应用. 北京: 中国人民大学出版社, 2007. [HE X Q. *Modern Statistical Analysis Methods and Applications*. Beijing: China Renmin University Press, 2007.]

Evaluation of the support capacity of land use system on regional sustainable development: Methods and empirical evidence

LI Han-bing^{1,2}, JIN Xiao-bin^{1,2,3}, WU Ke⁴, HAN Bo^{1,2}, SUN Rui^{1,2},
JIANG Guo-dong⁴, ZHOU Yin-kang^{1,2,3}

(1. College of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Province Land Development and Consolidation Technology Engineering Center, Nanjing 210023, China; 4. Department of Natural Resources of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: Land use system, as the key carrier of human interaction with nature, plays an important part in the process of regional sustainable development. In order to analyze its relevance to the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) and explain its support capacity, this paper constructs the connotation analysis framework of land use system, explores its supporting mechanism for SDGs and establishes the support capacity evaluation system for sustainable development, taking Shandong Province as an example for empirical analysis. The results show that: (1) Taking the land use system as the core, in the perspective of the relationship between human and land and its interactions with society, economy, ecological system, we analyze its operational mechanism in the coupling system of person, reveal its correlation with sustainable development, to determine the land use system of SDGs to provide theoretical analysis. (2) The support capacity of the land use system in Shandong province is distributed as "low in the east, but high in the west of the province; while high around the low surroundings of the urban center". During the study period, 66% of the support capacity was improved, and the change of support capacity showed the phenomenon of "uplift in the northwest and decline in the central and eastern regions". The direct support and self-stability of SDGs in the western plains with agricultural advantages has decreased, while the indirect support capacity has decreased, and the self-stability of the eastern economically developed areas has improved, while the direct and indirect support capacity has decreased. (3) The spatial correlation of each type of support capacity is significant. The significant areas are mostly distributed in the municipal districts. The radiation-driven agricultural development capacity of Heze city is strong. The economic output and social supply capacity of Dongying city are high-high agglomeration, and the stability of the land itself is low-low agglomeration. The research puts forward a new perspective on the sustainable development of land use system, which can provide reference for follow-up research, and empirical analysis lays a foundation for development decision-making in Shandong, and provides suggestions for the policy regulation of national spatial planning.

Keywords: land use system; sustainable development; land support; Shandong province