

王满意,陈明慧,李 申,等. 耕地健康产能评价及其空间分异——以济南市为例[J]. 江苏农业科学,2022,50(23):213–221.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2022.23.032

耕地健康产能评价及其空间分异 ——以济南市为例

王满意¹, 陈明慧¹, 李 申², 闫弘文¹, 殷冠羿¹, 王文琦³

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 山东济南 250358; 2. 山东省国土空间生态修复中心, 山东济南 250014;

3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:为厘清耕地健康产能的内涵,丰富市级尺度耕地健康产能评价的研究,以山东济南市为研究区,构建包括气候条件、耕地弹性、生产环境等 6 个要素在内的耕地健康产能评价指标体系。采用加权求和法、逐级修正法等对研究区耕地产能状况进行测度,采用 1 + X 累加法、乘法法对研究区耕地健康状况进行诊断,而后将二者叠加得到研究区耕地健康产能评价结果,并通过空间自相关对评价结果的空间分异特征进行探究。研究结果表明,研究区耕地产能较差的耕地面积占全区耕地总面积的 7.90%,主要分布于济南南部山区;耕地健康状况较差的耕地面积仅占全区耕地总面积的 1.51%,主要分布于济南历城区。耕地产能与耕地健康的全局莫兰指数分别为 0.602、0.632,即二者结果均存在显著的空间正相关性,且耕地健康的空间集聚效应更强。进一步的局部空间自相关测量结果显示,耕地产能热点区可能为耕地健康冷点区,即二者集聚结果不同质。济南市耕地健康产能评价结果分为健康、轻度亚健康、中度亚健康、重度亚健康和不健康 5 类,耕地健康产能状况总体较优,不健康耕地仅占全区耕地的 4.63%,且地域分异显著,整体上呈现北优南劣的特征;研究区耕地健康产能的总体评价结果受耕地健康状况的影响较大。本研究针对济南市耕地健康产能状况进行了评价,为较大尺度范围的耕地健康产能评价提供一定的参考价值。

关键词:土地评价;耕地健康;耕地产能;耕地健康产能评价;空间分异

中图分类号:F323.211 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2022)23–0213–09

“地乃粮之母”,耕地是粮食生产的基石,是人类生存和发展的基础。中国用不到全球 10% 的耕地养活了全世界近 1/5 的人口^[1],为解决全人类的粮食安全问题做出了巨大贡献,同时也为我国经济社会的发展提供了坚实的后盾。然而,建设占用、农业结构调整以及频繁的自然灾害使得耕地的数量和质量不断下降。据自然资源部发布的耕地数据,我国的耕地总面积已由 2009 年底的 20.307 7 亿亩(1 亩 = 667 m²)下降到 2019 年的 19.179 3 亿亩^[2],10 年间耕地面积缩减 1 亿亩。与此同时,土地盐渍化、荒漠化、重金属污染等耕地生态问题频发^[2–3],对我国的粮食安全产生严重威胁。这为政府和研究者们提出了一个难题:怎样在耕地数量减

少和质量下降的双重挑战下,维持耕地的产能,并同时保证农产品的绿色与安全? 党和政府一直高度重视耕地保护,2015 年习近平总书记对耕地保护工作做出过重要指示:“要实行最严格的耕地保护制度,要像保护大熊猫一样保护耕地”。2016 年中央一号文件提出,要加强农业生态保护和修复,同年我国开始在东北冷凉地等生态脆弱区开展耕地轮作休耕试点工作,着力探寻农业生产质量效益并举之路^[4]。在这样的背景下,耕地健康产能问题受到学者的广泛关注^[5]。

耕地健康产能的相关研究实质上是国际土壤理化质量的研究与中国可持续发展的有机结合^[6],其渊源可追溯到 20 世纪 40 年代。1941 年,美国生态学家 Leopold 曾定义土地健康的概念:土地自身能够抵御外界侵扰实现自我更新是健康的表现。同时使用土地疾病等术语描述土地功能上的紊乱^[7]。之后,国际上与耕地健康相关的研究转移到土壤健康上。20 世纪 80 年代,加拿大农业部门在其国内开展土壤健康研究项目,并定义土壤健康为土壤能够支撑作物生长而不危害环境的状态^[8]。

收稿日期:2022–01–07

基金项目:国家自然科学基金(编号:42171253)。

作者简介:王满意(1998—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事土地利用与区域规划方面的研究。E-mail:1278289026@qq.com。

通信作者:闫弘文,副教授,硕士生导师,主要从事土地利用与区域规划方面的研究。E-mail:preyan@163.com。

2011 年联合国粮食及农业组织指出:土壤健康是土壤维持植物生长和土壤功能稳定的能力。Bünemann 等探讨了土壤质量与土壤健康的区别,并列举了包括土壤有机质含量、pH 值等在内的表征土壤健康的常见理化指标^[9]。目前,国内对于耕地健康产能的研究主要集中在耕地健康的内涵界定、耕地健康产能评价等方面。李强等认为,耕地健康是一个复杂的综合概念,健康的耕地既要有好的环境、没有污染,又要有可观的产能,二者都不能缺少^[10-12]。健康是耕地发挥其正常作物生产功能和生态服务功能等五大功能的外在体现。与此同时,健康的耕地应该是可持续的,不仅包括时间而且也包括空间上的可持续。郎文聚等从 4 个方面解读健康的耕地的内涵,受到了较多学者的认可:一是耕地能够支持作物的正常生长,保证农产品质量可靠;二是耕地土壤拥有一定的肥力基础和净化污染的能力;三是耕地有能力抵抗正常的化肥、农药、沉降物等的侵害,保持其功能不失调;四是耕地生态系统在物质循环和能量流动过程中不会产生有毒有害物质^[13-14]。陈文广等认为,健康的耕地应首先具备持续、稳定的生产能力,其次农业生产的环境绿色无污染,生产的农产品健康无公害,最后还应该对外界干扰有一定的应对能力^[15]。随着人们对耕地数量、质量、生态“三位一体”保护的日益重视,对耕地健康的关注也逐步转移到耕地健康产能上。郎文聚等在 2015 年即提出,耕地健康产能本身是一复合的评价式概念,主要涵盖耕地的生产能力、生产环境、自我恢复能力及其生产的农产品的品质等方面^[14]。赵瑞等则从耕地健康和耕地产能 2 个方面对耕地健康产能的内涵进行界定^[16]。但学界目前对于耕地健康产能的内涵尚未形成统一见解,相关研究也较少。本研究在现有研究的基础上结合研究区的特点,将耕地健康产能的内涵界定为:首先耕地要有较高的、稳定的产能,这要求耕地要有一定的地力,质量要可靠,水热条件适合当地作物生长;其次耕地要有良好的健康状况,这不仅要求耕地要有良好的生态环境,还要求耕地对外界侵害具有一定的抵抗能力和自我修复能力。耕地只有满足以上 2 点,才能满足人们日益增长的美好生活需要。关于耕地健康产能评价的研究则主要围绕指标体系构建与评价方法创新 2 方面展开,评价尺度以区(县)级为主,缺乏更大尺度范围内的探索。相关学者基于能值分析和模糊评价方法^[17],从耕地

质量、耕地产能、耕地环境方面选取指标对县域耕地健康做评价,区分出其健康、亚健康和不健康的状态;赵瑞等将耕地健康与耕地产能分别评价后再将二者耦合得到研究区的耕地健康产能情况^[16,18-19,15]。在评价方法上,以《农用地质量分等规程》^[20]为指导,通过连乘法、1+X 累加模型、最小限制因子法等对耕地健康产能状况进行测算。但是由于缺乏生物活性指标,使得其评价成果的准确性降低。宏观尺度上,叶思菁等以全国范围内的 65 个试点县为研究对象对中国的耕地健康产能进行评价,并通过分析各项指标的标准差收敛特征将 65 个样本的耕地健康产能等级划分为健康、亚健康、不健康 3 类^[21],实现了跨越自然区的耕地健康产能状况可比。

目前,有关市级及以上尺度的耕地健康产能的研究还不多,本研究以山东济南市为研究区,从气候条件、耕层特征、地块状况和技术水平 4 个方面选取指标对研究区的耕地产能进行评估;从耕地弹性和生产环境方面选取指标对耕地健康进行诊断,其中耕地弹性^[15]是指耕地抵抗外界侵扰从而恢复正常的的能力;然后,选取全局莫兰指数(Global Moran's I)和热点分析(Getis - Ord G_i^*)对研究区耕地健康与产能的评价结果的空间集聚状况进行表征;最后,将耕地健康与耕地产能二者叠加获取研究区的耕地健康产能状况,分析其空间特征,以期能够为济南市耕地数量、质量、生态三位一体保护提供核算参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区(图 1)位于 36°01'~37°32'N、116°11'~117°44'E 之间,地势南高北低,南与泰山相依,北跨黄河与德州、滨州比邻,地处低山丘陵与冲击平原交界处。研究区属暖温带大陆性季风气候,四季分明,日照充足,年均温度 13.6℃,年均降水量 614.0 mm。研究区属农用地质量分等一级指标区的黄淮海区,二级分区跨越冀鲁豫低洼平原区和山东丘陵区,共计分为鲁西北平原区、泰鲁沂蒙山地丘陵区、济潍山前平原区和汶、泗及湖东平原区 4 个指标区;作物熟制为一年两熟,基准作物为小麦,指定作物为小麦和玉米;共辖历下、市中、槐荫、天桥、历城、长清、章丘、济阳、莱芜、钢城 10 个区和平阴、商河 2 个县。2020 年地区生产总值为 10 140.9 亿元,户籍总人口达 806.7 万,常住人口 920.24 万。

研究区系黄河流域生态文明与区域协调的中高点定位,更是我国新旧动能转换的试验高地。以 2019 年研究区耕地质量等别更新数据库中的耕地图斑为评价单元,处理后的评价单元共计 202 639 个。

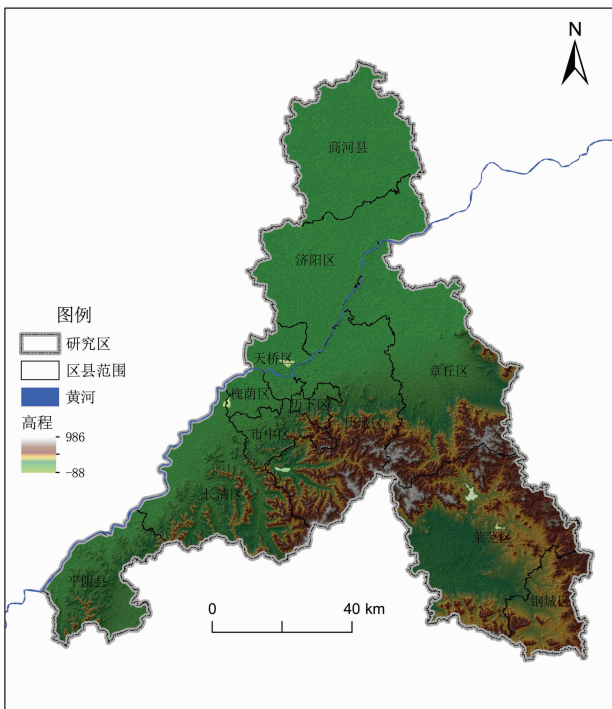


图 1 研究区概况

1.2 数据来源

行政区划矢量数据来源于 2019 年济南市土地利用现状变更调查数据库,DEM 数据和黄河范围矢量数据来源于地理国情数据云平台。光温生产潜力、产量比系数来源于《农用地质量分等规程》^[20];表层土壤质地、盐渍化程度、障碍层次、排水条件等数据来源于 2019 年济南市耕地质量等别成果数据库;土壤 pH 值、生物多样性数据来源于 2020 年研究区耕地资源质量分类成果数据库;重金属污染状况数据来源于野外采样检测;降水量、年平均温度、农药化肥施用量、粮食产量等数据来源于各年份研究区统计年鉴和统计公报。

2 评价过程

2.1 评价指标体系的构建

耕地拥有包括生产功能和生态服务功能在内的多项功能^[10],并且这些功能仍随着人类社会的发展而不断细化,这是由人类的需求决定的。最初,耕地给人类供给必要的生存要素,仅发挥其生产功能^[18]。当人类吃饱以后转而追求更多其他享受,这些享受仍要以耕地能够提供足量农产品供给为前

提,于是高度集约化生产成为耕地主要的生产方式。这种高强度、高负荷的作业方式给耕地本身带来了巨大压力^[22],产生了地力下降^[23]、土壤板结、面源污染加剧^[24]等众多问题。生态环境部 2014 年发布的调查^[25]显示,中国耕地土壤点位超标率近 20%。在这种情况下,国民开始意识到保护耕地的重要性,立足于数量、质量、生态的三位一体保护^[4]日益受到政府和公众的重视。这意味着耕地不仅要有持续稳定的产能,还要有良好的健康状况,以满足人们日益增长的美好生活需要。因此,耕地的健康状况也逐渐成为人们关注的重点,基于人类需求-耕地供给构建的耕地健康产能评价理论框架见图 2。耕地产能状况主要从气候条件、耕层特征、地块状况、技术水平 4 个方面进行测算,耕地健康状况主要从耕地弹性、生产环境 2 个方面进行诊断,耕地产能与耕地健康评测结果叠加构成研究区耕地健康产能状况。

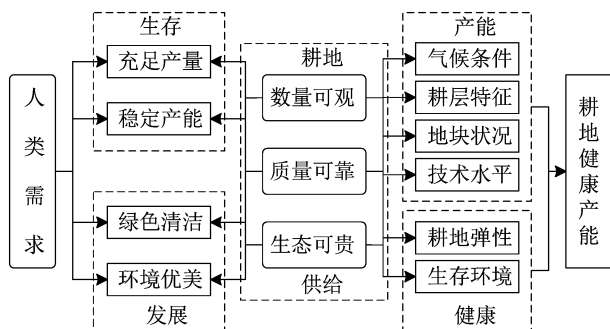


图2 耕地健康产能评价理论框架

根据研究区特点和数据获取难易程度选取指标分别对耕地产能和耕地健康进行评价,指标的选取参考了《农用地质量分等规程》(GB/T 28407—2012)^[20]、《耕地地力调查与质量评价技术规程》(NY/T 1634—2008)^[26]、《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)^[27]、《自然资源分等定级通则》(TD/T 1060—2021)^[28]、《第三次全国国土调查耕地资源质量分类工作方案》等。现有研究缺乏生物活性指标,或以蚯蚓条数代替,该指标受外界环境影响较大,且在一定时间内不具有稳定性,使得评价结果的说服力降低。因此,本研究的生物活性选取生物多样性指标进行表征,主要依据土壤样点的 Chao1 指数值在全省中的位次确定其等级再根据各区(县)地类区别赋值到图斑;地块破碎度指标计算参考李文灏等的研究成果^[29];粮食生产变异系数、机械化耕种水平、农药与化肥施用量指标值通过统计各区(县)各年份相应指标值并计算,最终赋值到图斑。

耕地产能和耕地健康指标赋分与分级参考了《农用地质量分等规程》(GB/T 28407—2012)^[20]、《山东省耕地质量等级成果补充完善技术细则》、《自然资源分等定级通则》(TD/T 1060—2021)^[28]。部分指标如地块破碎度、农药化肥施用量等的赋分和分级参考了现有研究^[15,19]。详细的指标内容及赋分规则见表1、表2、表3。

2.2 评价方法

本研究将耕地产能与耕地健康分别评价,而后将二者叠加形成耕地健康产能状况结果。分别采用加权求和法、逐级修正法、1+X累加法、叠加法等方法对研究区耕地健康产能进行测算。各指标权重在参考《农用地质量分等规程》(GB/T 28407—2012)的基础上,采用德尔菲法与熵权法相结合确定。最后,采用空间自相关对评价结果的空间分布状况进行探究。

2.2.1 研究区耕地产能评价

(1)计算研究区某一评价单元的某一指定作物的耕地产能指数分值。

$$R_{ij} = \alpha_{ij} \times \beta_j \times (W_{ijk} \times f_{ijk}) / 100。$$
 (1)

式中: R_{ij} 为第*i*个评价单元内第*j*种指定作物的耕地产能指数($i=1,2,\cdots,202\ 639;j=1,2$); α_{ij} 为第*i*个评价单元所在县的第*j*种指定作物的光温生产潜力; β_j 为第*j*种指定作物的产量比系数; W_{ijk} 为第*i*个评价单元所在指标区的第*j*种指定作物的第*k*个指标的权重($k=1,2,\cdots$); f_{ijk} 为第*i*个评价单元所在指标区的第*j*种指定作物的第*k*个指标的分值。

(2)计算研究区某一评价单元的年度耕地产能指数。由于研究区内作物熟制为一年两熟,且指定作物为玉米和小麦,故第*i*个评价单元的耕地产能指数为:

$$R_i = \sum R_{ij}。$$
 (2)

式中: R_i 为第*i*个评价单元的耕地产能指数。

2.2.2 研究区耕地健康评价 耕地健康状况的诊断由耕地弹性和生产环境状况组成,耕地弹性主要表征耕地受到外界侵害时的恢复能力,生产环境主要衡量耕地的生态环境状况。

(1)计算研究区某一评价单元的耕地弹性分值。

$$RE_i = \sum_{k=1}^5 W_{ik} \times f_{ik}。$$
 (3)

式中: RE_i 为第*i*个评价单元的耕地弹性分值($i=1,2,\cdots,202\ 639;$); W_{ik} 为第*i*个评价单元的第*k*个指

表 1 济南市耕地产能评价指标体系及赋分规则

要素	指标	赋分规则									
		100 分	90 分	80 分	70 分	60 分	50 分	40 分	30 分	20 分	10 分
气候条件	光温生产潜力										
耕层特征 ^a	产量比系数										
	表层土壤质地										
	土壤有机质含量(g/kg)										
	土壤 pH 值										
耕层特征 ^b	有效土层厚度(cm)										
	剖面构型										
	盐渍化程度										
	障碍层次										
地块状况	地表岩石露头										
	坡度										
技术水平 ^a	地块破碎度										
	灌溉保证率										
技术水平 ^b	机械化作种水平										
	排水条件										

注:上标^a和^b分别表示研究区必选指标和研究区内不同指标区的备选指标;上标玉米则表示该指标对应的指定作物为玉米时的分值,其余未带玉米字样的指标适用于研究区所有指定作物。

表 2 济南市耕地弹性指标体系及赋分规则

要素	指标	赋分规则								
		100 分	90 分	80 分	70 分	60 分	50 分	40 分	30 分	20 分
耕地弹性	表层土壤质地	轻壤土、 中壤土	黏土、 重壤土		沙壤土		沙土、砾质土			砾石土
	土壤 pH 值	[6.5,7.5)	[5.5,6.5)或 [7.5,8.5)						(0,5.5)或 [8.5,+∞)	
	生物多样性	丰富			一般			不丰富		
	粮食生产变异系数	(0,5%)	[5%,10%)			[10%,15%)	[15%,20%)	[20%,100%)		
	土壤有机质含量(g/kg)	[20,+∞)	[15,20)		[12,15)	[10,12)	[8,10)	(0,8)		

表 3 济南市耕地生产环境评价指标分级

要素	指标	分级				
		0	-0.05	-0.10	-0.20	-0.40
生产环境	土壤重金属污染状况	清洁			轻微污染	污染
	农药施用量(kg/hm ²)	[0,7)	[7,13)	[13,+∞)		
	化肥施用量(kg/hm ²)	[0,255)	[255,450)	[450,+∞)		

注:分级值越小代表生态环境受到的污染越严重,通过下文公式(4)的计算最终反应到评价结果中,相关数值的确定参考了陈文广等的研究成果^[15]。

标的权重($k=1,2,3,4,5$); f_{ik} 为第*i*个评价单元第*k*个指标的分值。

(2)计算研究区某一评价单元的生产环境分值。

$$E_i = 1 + \sum_{k=1}^3 X_{ik} \circ \tag{4}$$

式中: E_i 为第*i*个评价单元的耕地生产环境分值,“1”表示该评价单元的耕地环境没有受到污染的风险, X_{ik} 代表着第*i*个评价单元的第*k*个指标对耕地环境的威胁等级。

(3)计算研究区某一评价单元的耕地健康状况分值。

$$H_i = RE_i \times E_i \circ \tag{5}$$

式中: H_i 为第*i*个评价单元的耕地健康状况分值; RE_i 为第*i*个评价单元的耕地弹性分值; E_i 为第*i*个评价单元的耕地生产环境分值。

2.2.2.3 研究区耕地健康产能状况 使用 Jenks 分类法将耕地产能指数划为较优产能、中等产能和较差产能共三等,将耕地健康状况按照从好到坏划分为 5 级。然后通过叠加耕地产能和耕地健康来划分耕地健康产能状况,参考赵瑞等的研究结果^[16,30],按照以下叠加原则(表 4)最终将耕地健康产能状况划分为健康、轻度亚健康、中度亚健康、重度亚健康和亚健康和不健康共 5 类。

2.2.2.4 空间自相关

(1)全局空间自相关。通过 Global Moran’s I 对耕地健康与耕地产能状况在各乡镇间的自相关程

表 4 济南市耕地健康产能评价叠加原则

等级	较优产能	中等产能	较差产能
1 级	健康	轻度亚健康	中度亚健康
2 级	轻度亚健康	中度亚健康	重度亚健康
3 级	中度亚健康	重度亚健康	重度亚健康
4 级	重度亚健康	重度亚健康	不健康
5 级	不健康	不健康	不健康

度进行测算,用以表征研究区评价结果的空间分布特征。公式如下

$$Moran's\ I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \circ \tag{6}$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; $j \neq i$; n 表示乡镇数量; x_i 表示在*i*镇/乡/街道中的耕地健康或耕地产能指数的面积加权值; W_{ij} 表示空间权重矩阵。当 Moran’s I 的值接近 0,表示耕地健康/产能的空间相关性较弱;当 Moran’s I 的值越接近 1,则研究区耕地健康/产能分布趋向于集聚,反之接近 -1 时,趋向于分散。

(2)局部空间自相关。采用 Getis - Ord G_i^* 以乡镇为单位分析研究区耕地健康/产能在局部的空间分布的异质性,公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \circ \tag{7}$$

式中: n 表示乡镇数量; W_{ij} 表示空间权重矩阵; X_j 为

某乡镇的耕地健康/产能的分数值。当通过显著性检验时,若 $G_i^* > 0$,则为高值聚集区,即热点区;反之, $G_i^* < 0$,则为低值聚集区,也即冷点区。

3 评价结果及空间分布特征

3.1 耕地产能

通过查阅《山东省耕地质量等级成果补充完善技术细则》确定各县(区)指定作物的光温生产潜力值,依据前文所述评价方法,对研究区耕地产能状况进行测算。研究区耕地产能指数范围在 1 095 ~ 3 000 之间,耕地产能指数纵向差距为 1 905,差距较大。使用 Jenks 分类法将耕地产能指数划为较优产能、中等产能和较差产能共 3 等,其中评价结果为较优产能的耕地数量最大,面积达 282 406.22 hm^2 ,占耕地总面积的 66.08%;中等产能耕地面积为 111 187.73 hm^2 ,占 26.02%;产能较差的耕地数量最小,面积为 33 757.69 hm^2 ,占 7.90%。

3 类耕地产能空间分布情况如图 3(左)所示,通过观察图 3 可以发现,研究区的耕地产能呈现出北高南低、西高东低的总体特征,且在南部平阴县、

长清区、历城区、章丘区以及莱芜区具有一条十分明显的低产能集聚带,类别上主要以较差产能为主。这条低产能集聚带跨越了研究区耕地质量分等 3 级指标区中的泰鲁沂蒙山地丘陵区 and 济潍山前平原区。这一地带与研究区的其他区域相比,地势较为起伏,地形以山地丘陵为主;土壤质地方面沙壤土、砾质土、黏质土杂居分布;土层厚度以 60 ~ 100 cm 为主,部分地区土层厚度小于 60 cm,土壤有机质含量不高,生物多样性水平总体一般。这一地带的机械化耕种水平也较低,或因坡度起伏所致。研究区西部、北部连片区域,包括商河县、济阳区、天桥区、市中区、历城区与章丘区的北部,耕地产能普遍较高,仅有少量低产能耕地异质分布。这些区域主要为耕地质量分等指标区中的鲁西北平原区和济潍山前平原区的西部、北部。这一区域地势较为平坦,利于机械化作业。土壤质地以壤质为主,土层厚度普遍大于 100 cm,适合作物生长发育。产能分类为中等的图斑不规则分布于研究区各地,其中以济阳区数量最多,总面积达 25 047.30 hm^2 ,占该区耕地总面积的 35.53%。

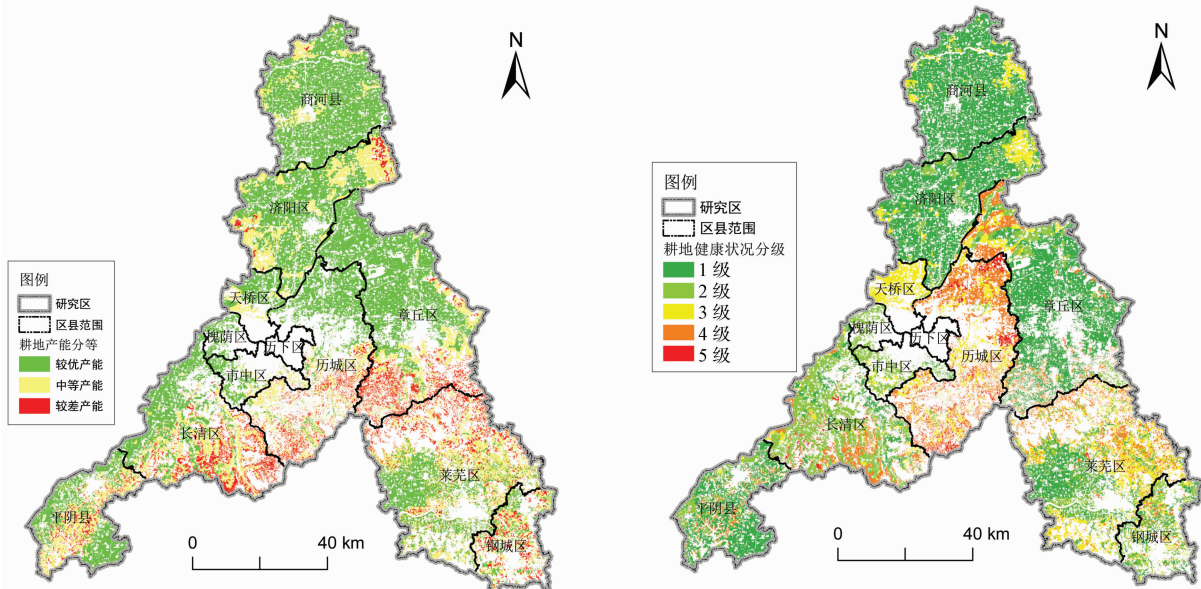


图 3 研究区各类耕地产能(左)与耕地健康(右)空间分布

3.2 耕地健康

依据前文所述方法,对研究区耕地健康状况进行测算,结果发现,研究区耕地健康状况分值处于 38.4 ~ 93.1 分之间,相差 54.7 分,分值差距较大。采用 Jenks 分类法将耕地健康状况从好到坏分为 5 级,耕地健康状况等级为 1 级的耕地数量为 229 301.18 hm^2 ,占 53.66%,数量最多;2、3、4 级耕

地数量分别为 84 280.91、63 067.81、44 251.16 hm^2 ,分别占 19.72%、14.76%、10.35%;耕地健康状况最差的耕地数量最少,为 6 450.57 hm^2 ,占 1.51%。由图 3(右)可知,研究区耕地健康状况呈现出外优内差的分布特征,即研究区中部地区的耕地健康状况较差,外围地区耕地健康状况较好。中部以历城区为代表,连带天桥区、长清区、莱芜区以及章丘区

北部,耕地健康状况处于较低水平。历城区耕地健康等级以 4 级和 5 级为主,耕地健康状况较差。主要因为其表层土壤质地较差,以砾石土、沙壤土为主,等级过低;其次,该区域的粮食年产量变异系数较大,粮食年产量不稳定,导致其耕地弹性分值偏低;在农业生产过程中,该区域趋向于使用大量农药与化肥,致使耕地生产环境评分也较低,进而影响整体的耕地健康状况。研究区北部的商河县、济阳区 and 章丘区耕地健康状况以 1 级为主,明显区别于中部地区。这一地区土壤质地以轻壤土为主,利于作物生长;此外,该地区生物多样性水平亦明显优于其他部位,所有图斑评级皆为丰富。

3.3 空间自相关

3.3.1 全局空间相关性 为探究研究区耕地产能与耕地健康的空间分布状况,本研究选取 Global Moran's I 和 Getis - Ord G_i^* 对研究区评价结果的空间分布特征进行分析。首先将各评价单元(图斑)

的耕地产能指数(耕地健康分值)以面积加权的方式赋给各乡(镇),再通过 GeoDa 软件分别测算研究区的 Global Moran's I 和 Getis - Ord G_i^* , Global Moran's I 结果如下(表 5、图 4)。研究区耕地产能指数和耕地健康分值的 Moran's I 值为正,且通过了 1% 的显著性检验,表明研究区耕地产能指数和耕地健康分值均存在显著的空间正相关性,空间分布上呈集聚态势,具体表现为较优/差耕地产能(健康状况)地区在空间上趋于邻近。对比来看,研究区耕地健康状况的 Moran's I 明显比耕地产能的高,也即耕地健康状况的空间集聚效应更强。

表 5 研究区耕地产能(健康)全局空间自相关结果

类别	Moran's I	期望指数 $E[I]$	标准差	P 值	z 得分
耕地产能指数	0.602	-0.009 4	0.067 2	0.001 0	9.106 0
耕地健康分值	0.632	-0.009 4	0.065 2	0.001 0	9.861 0

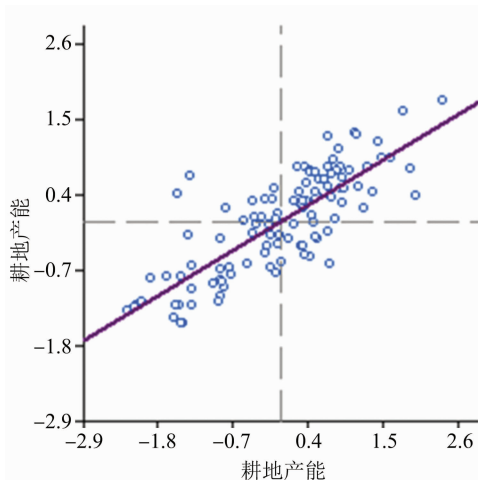
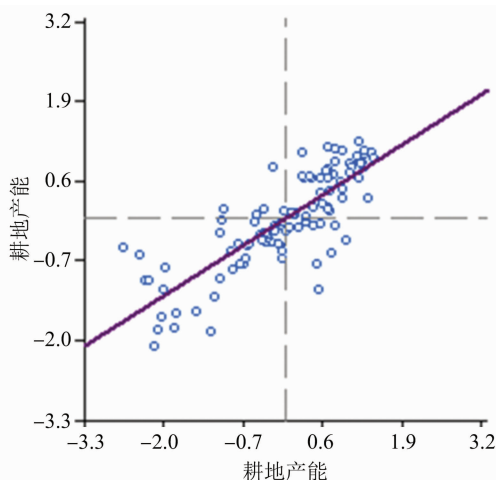


图4 研究区耕地产能与耕地健康Moran's I 散点图



3.3.2 局部空间相关性 为进一步探究耕地产能/健康优(差)地区的集聚效应,本研究通过 GeoDa 软件计算得到 Getis - Ord G_i^* 值,而后将 G_i^* 值由高到低划分为 5 类,并进行可视化(图 5)。研究区的耕地产能与耕地健康状况存在显著的空间分异特征。对于耕地产能,整体上北热南冷,热点区主要分布于研究区中部并被次热点区域环抱。对比研究区耕地产能空间分布图发现,热点及次热点区也即耕地产能指数较高的商河县、长清区、历城区的北部;冷点及次冷点区则分布于低产能集聚带上,尤以章丘区南部和长清区东南部为甚,钢城区则整体处于冷(次冷)点区,表明各乡(镇)耕地产能状况堪忧。耕地健康的空间集聚状况与耕地产能不尽相同,尤

以历城区北部的差异最为明显,这一区域本为耕地产能的热点区,但却是耕地健康状况的冷(次冷)点区。同热同冷区域包括商河县及历城区南部区域,表明这类区域的耕地产能水平及耕地健康状况均处于同优(同差),由此可推知其耕地健康产能状况必然处于较高(较低)的水平。章丘区的大部分区域处于耕地健康热(次热)点区,商河县整体处于热(次热)点区,表明这些区域不仅耕地健康状况较好而且分布较为集聚。

3.3 耕地健康产能状况

通过对研究区耕地产能与耕地健康评价结果进行叠加,得到研究区耕地健康产能评价分级结果。研究区耕地健康产能状况总体良好,健康耕地数量最

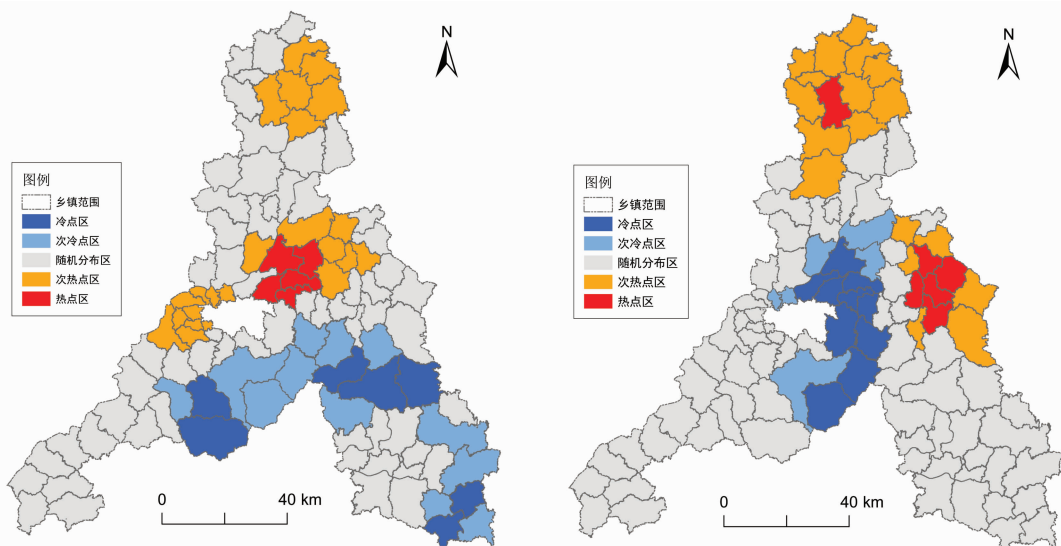


图5 研究区耕地产能(左)、耕地健康(右)空间冷热点图

多,面积为 178 912.29 hm^2 ,占 41.87%;评级为轻度亚健康的耕地数量排在第 2 位,面积 94 812.94 hm^2 ,占 22.19%;紧接着的是重度亚健康、中度亚健康耕地,面积分别为 69 235.85、64 607.58 hm^2 ,占比依次为 16.20%、15.12%;数量最少的为不健康耕地,面积为 19 782.98 hm^2 ,占研究区耕地总面积的 4.63%。借助软件将研究区耕地产能评价结果进行可视化表达(图 6),研究区的耕地健康产能空间格局与耕地健康和耕地产能的空间格局具有极强的相关性。首先,研究区北部的商河县、济阳区、章丘区和莱芜区的中西部的耕地产能与耕地健康状况都表现较佳。因此,除少量轻度及中度亚健康图斑杂居分布外,这些区域耕地健康产能的测算结果以健康和轻度亚健康为主。而耕地产能的低产能聚集带和耕地健康的较差区域都覆盖的历城区,其耕地健康产能状况也堪忧。在历城区内部,基本无健康、轻度亚健康图斑分布,全区呈现不健康与重度亚健康图斑交叉布局。不仅如此,耕地产能评级较优的历城区北部,耕地健康产能状况为不健康与重度亚健康。这是因为历城区北部的耕地表层土壤质地较差,而这一指标在耕地弹性评价中占比较高,从而导致该区域耕地弹性分值较低,同时也说明耕地健康状况对耕地健康产能评价结果影响更大;与此同时,历城区农业与化肥施用量较周边区(县)更多,因此其生产环境分值也较低。这样可能导致原本较优的耕地产能被分值较低的耕地健康状况所覆盖,最终该区域耕地健康产能状况较差。平阴县的耕地健康状况对其耕地产能评价结果也

有一定的“拖拽”作用,最终使得该县耕地健康产能总体状况较优,不健康耕地仅占该县耕地总面积的 5.5%。但其耕地健康产能状况的布局与长清区、钢城区相似,皆为各等级图斑杂居分布,这给耕地的治理带来了一定的难度;最后,研究区市中心周边的耕地健康产能状况较差,而这部分耕地的有机质含量等级偏低,或因郊区高度集约化的农业生产导致其耕地地力下降,最终造成其耕地健康产能状况偏低。

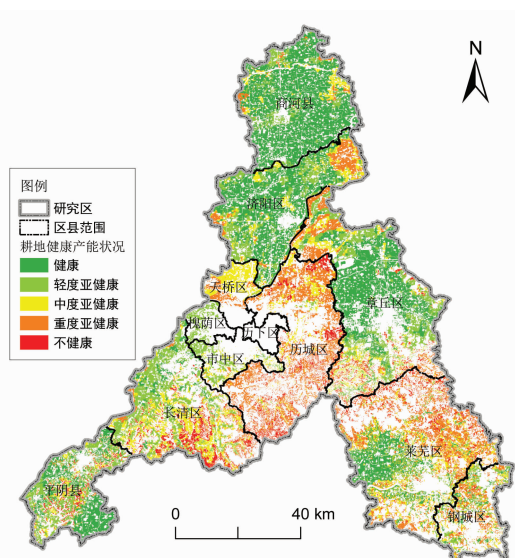


图6 研究区耕地健康产能评价结果空间分布

4 结论

本研究基于人类需求-耕地供给理论框架构建研究区耕地健康产能评价指标体系,使用了耕地分等数据和最新的耕地资源质量分类数据,采用加

权求和法、逐级修正法、1 + X 累加法等对研究区耕地健康与耕地产能状况分别评价,而后将二者按照一定规则叠加得到研究区耕地健康产能评价结果,采用空间自相关对评价结果的空间集聚状况进行分析,得到以下结论:(1)研究区耕地产能与耕地健康状况存在显著的空间正相关性,空间分布上呈集聚态势,且耕地健康的集聚态势更强。采用 $Getis - Ord G_i^*$ 对研究区耕地健康与耕地产能状况分别探测,发现二者具有明显的差异,耕地健康冷点区可能为耕地产能的热点区。(2)研究区的耕地产能总体较优,健康状况总体较好,但仍存在数量不容小觑的低产能和不健康耕地。这些图斑主要分布在历城区及其周边区域,因此历城区应该成为未来研究区土地整治的重点关注对象。以商河县为主的广阔地区的耕地健康产能评价结果较优,下一步应加强对该区域的保护,防止其耕地产能下降,或是健康状态“转安为危”。(3)食为政首,粮安天下,耕地保护是关系国计民生的大事。基于数量、质量、生态三位一体的耕地保护意味着耕地健康产能水平的不下降。本研究探究了世纪尺度区域耕地健康产能的评价方法,实现了不同耕地质量分等指标区之间的耕地健康产能可比。省级或更大尺度下的耕地健康产能评价有待进一步研究阐明。

参考文献:

- [1] 方 斌,牛善栋,黄木易. 吃饱和吃好语境对我国耕地保护的启示[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(10):2533 - 2544.
- [2] 中央政府门户网站. 自然资源部发布第三次全国国土调查成果[EB/OL]. (2021 - 08 - 26)[2021 - 10 - 25]. http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202108/t20210826_2678340.html.
- [3] 赵颖文,吕火明. 刍议改革开放以来中国农业农村经济发展:主要成就、问题挑战及发展应对[J]. 农业现代化研究,2019,40(3):377 - 386.
- [4] 中央政府门户网站. 中共中央国务院关于落实发展新理念加快农业现代化实现全面小康目标的若干意见[EB/OL]. (2016 - 01 - 27)[2021 - 10 - 25]. http://www.gov.cn/zhengce/2016 - 01/27/content_5036698.html.
- [5] 李子琳,李 婕,郭 熙,等. 基于 CiteSpace 的耕地质量内涵演变及影响因素研究进展[J]. 江苏农业科学,2020,48(4):52 - 58.
- [6] 郇文聚. 呵护耕地健康 维系自然生态[N]. 中国自然资源报,2019 - 05 - 23(3).
- [7] Leopold A. Wilderness as land laboratory[J]. Living Wldemess, 1941,6(2):3.
- [8] 冷疏影,李秀彬. 土地质量指标体系国际研究的新进展[J]. 地理学报,1999,54(2):177 - 185.
- [9] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality—A critical review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018,120:105 - 125.
- [10] 李 强,严金明,赵 焯. 耕地健康也需诊断[J]. 中国土地,2011(11):37 - 39.
- [11] 李 强,彭文英,王建强,等. 乡镇企业发达区耕地健康评价与驱动机理研究[J]. 自然资源学报,2015,30(9):1499 - 1510.
- [12] 李 强,彭文英. 生态脆弱区耕地健康诊断体系构建及评价实践[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(7):67 - 72.
- [13] 郇文聚,吴克宁,张小丹. 中国耕地健康问题及防治对策[J]. 中国发展,2019,19(4):34 - 37.
- [14] 郇文聚,梁梦茵,汤怀志. 提升耕地质量重在健康产能建设[J]. 中国土地,2015(3):22 - 23.
- [15] 陈文广,孔祥斌,温良友,等. 基于需求 - 功能 - 维度的耕地健康评价指标体系构建与应用[J]. 中国农业大学学报,2021,26(5):106 - 117.
- [16] 赵 瑞,吴克宁,张小丹,等. 粮食主产区耕地健康产能评价:以河南省温县为例[J]. 中国土地科学,2019,33(2):67 - 75.
- [17] 李 强,彭文英,王建强,等. 乡镇企业发达区耕地健康评价与驱动机理研究[J]. 自然资源学报,2015,30(9):1499 - 1510.
- [18] 张小丹,吴克宁,赵 瑞,等. 县域耕地健康产能评价[J]. 水土保持研究,2020,27(3):294 - 300.
- [19] 温良友,张青璞,孔祥斌,等. 基于产能与健康综合评价的北京大兴区耕地整治分区[J]. 农业工程学报,2019,35(22):79 - 89.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 农用地质量分等规程:GB/T 28407—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [21] 叶思菁,宋长青,程 锋,等. 中国耕地健康产能综合评价与试点评估研究[J]. 农业工程学报,2019,35(22):66 - 78.
- [22] 杨智慧,路欣怡,孔祥斌,等. 中国耕地刚性管制与弹性调控框架构建[J]. 中国土地科学,2021,35(6):11 - 19.
- [23] 赵文力,刘湘辉,鲍丙飞,等. 长株潭城市群县域生态安全评估研究[J]. 经济地理,2019,39(8):200 - 206.
- [24] 欧阳竹,邓祥征,孙志刚,等. 面向国民经济主战场的区域农业研究[J]. 地理学报,2020,75(12):2636 - 2654.
- [25] 中央政府门户网站. 环境保护部国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014 - 04 - 17)[2021 - 10 - 25]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670_wh.htm.
- [26] 中华人民共和国农业部. 耕地地力调查与质量评价技术规程:NY/T 1634—2008[S]. 北京:中国农业出版社,2008.
- [27] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 耕地质量等级:GB/T 33469—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [28] 中华人民共和国自然资源部. 自然资源分等定级通则:TD/T 1060—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
- [29] 李文灏,沈 俊. 水网平原地区耕地破碎化时空变化研究[J]. 浙江农林大学学报,2021,38(4):723 - 729.
- [30] 高 涵,陈伟强,郇文聚,等. 东北典型平原区耕地健康产能评价与验证:以吉林省大安市为例[J]. 土壤通报,2020,51(4):784 - 794.