

# 县域耕地健康产能评价

张小丹<sup>1,2</sup>, 吴克宁<sup>1,2</sup>, 赵瑞<sup>1,2</sup>, 杨淇钧<sup>1,2</sup>

(1.中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2.自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

**摘 要:**耕地的产能水平和健康状况是保障粮食安全和可持续发展的基础,对耕地健康产能进行研究,有利于指导优质耕地优先划入基本农田,全面落实耕地数量、质量、生态“三位一体”保护。在梳理土壤健康、耕地产能等研究基础上,界定耕地健康产能的内涵,并将生物活性、作物品质、系统弹性等指标纳入耕地健康产能评价指标体系,运用加权求和法、“1+X”累加模型、连乘法、叠加法等方法对研究区进行了实证研究。结果表明:研究区耕地产能呈现出由东北地区向西南地区逐渐降低的趋势,耕地健康产能评价结果与耕地健康诊断结果具有相似的规律性,研究区耕地健康产能总体状况良好,级别较低的耕地主要分布在研究区的南部及 S 湖沿岸,南部大部分为丘陵区,土壤养分含量低,基础设施不完善,产能较低,又由于产业结构和 S 湖污染的影响,耕地重金属污染严重,导致耕地多为不健康类型。建立的评价指标体系能够反映研究区耕地健康产能的实际情况,能为县域耕地健康产能评价提供借鉴。今后还应重点研究其他尺度的评价指标体系,探索提升耕地健康产能的措施,建立长期的监测网络,为永久基本农田划定和耕地保护提供决策依据。

**关键词:**土地资源; 耕地健康; 耕地产能; 评价; 粮食安全

**中图分类号:** F301.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2020)03-0294-07

## Evaluation of Healthy Productivity of Cultivated Land at County Scale

ZHANG Xiaodan<sup>1,2</sup>, WU Kening<sup>1,2</sup>, ZHAO Rui<sup>1,2</sup>, YANG Qijun<sup>1,2</sup>

(1.School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2.Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

**Abstract:** The cultivated land productivity and the health status of cultivated land are the basis for ensuring food security and sustainable development. Study on the healthy productivity of cultivated land is beneficial to guide high-quality cultivated land to be preferentially allocated to basic farmland and comprehensively implement the quantity, quality and ecological protection of cultivated land. Based on the research of soil health and cultivated land productivity, we defines the connotation of the healthy productivity of cultivated land, and the indicators of biological activity, crop quality and system elasticity were included in the evaluation index system. We used the weighted summation method, the ‘1+X’ accumulation model, the continuous product method, the superposition method to conduct empirical research on the study area. The productivity of cultivated land in the study area shows the trend of decreasing from the northeast to the southwest. The results of cultivated land health productivity and cultivated land health diagnosis have similar regularity. The overall healthy productivity of cultivated land in the study area is in good condition. The lower-grade cultivated land mainly distributes in the southern part of the study area and along the ‘S’ lake. Most of the cultivated land in the south is located in the hilly area, the soil nutrient content is low and the infrastructure is imperfect, resulting in lower productivity, and heavy metal pollution in cultivated land is serious due to industrial structure and the impact of ‘S’ Lake pollution, resulting in most unhealthy irrigated land. The evaluation index system established in this study can reflect the actual situation of the cultivated land healthy productivity in the study area, and can provide some references for the evaluation of the cultivated land healthy productivity at the county scale. In the future, the study should focus on the evaluation system of

收稿日期: 2019-06-20

修回日期: 2019-07-09

资助项目: 国家重点研发计划项目“土地整治与农用地质量监测评价标准研究”(2017YFF0206801)

第一作者: 张小丹(1992—), 女, 河北保定人, 博士生, 研究方向: 土地资源评价与利用规划。E-mail: zxd3249@163.com

通信作者: 吴克宁(1963—), 男, 北京人, 教授, 博士, 研究方向: 土地资源评价与利用规划。E-mail: wukening@cugb.edu.cn

different scales, exploring measures to improve the healthy productivity of cultivated land, and establishing a long-term monitoring network to provide decision-making basis for permanent basic farmland delineation and farmland protection.

**Keywords:** land resources; cultivated land health; cultivated land productivity; evaluation; food security

全球粮食安全问题是 21 世纪最关键的挑战之一<sup>[1]</sup>,耕地是保障粮食安全的重要资源。我国用占全球不到 10% 的耕地,养活了全球 20% 的人口,实现了粮食产能稳定。随着社会经济的发展,人类对粮食的需求也从数量逐渐转向健康、可持续。因此保障国家粮食安全,不仅要重视耕地综合生产能力的提高,也要重视耕地环境和农产品对人类健康的影响,即强调基于耕地健康意义上的产能。国际上的研究多集中在土壤健康(土壤质量)、农业生态系统健康等方面。加拿大 1998 年发表的《农业生态系统健康:分析与评价》中指出,农业生态系统健康是指农业生态系统避免发生失调综合症、处理胁迫的状态和满足持续生产农产品的能力<sup>[2]</sup>。多数学者认为土壤健康是土壤维持作物生长、改善环境质量、促进动植物和人类健康的可持续发展的能力<sup>[3-6]</sup>。加拿大在 80 年代中期开展了土壤健康项目,摸清了加拿大的土壤健康情况,提升了土壤整治的效果<sup>[7]</sup>;康奈尔土壤健康团队于 2007 年建立了康奈尔土壤健康评价系统,逐渐发展为土壤健康综合评估,并对美国大西洋中部、中西部和美国东北部进行了评估<sup>[8]</sup>;德国土壤质量定级方案中从基础项和风险项两个维度评价土壤质量<sup>[9]</sup>。我国学者多集中于耕地质量和耕地产能方面的研究,并取得了丰富的成果<sup>[10-13]</sup>。近年来,为了满足耕地数量、质量、生态三位一体保护的要求,健康的概念也逐渐融入到耕地质量和产能的评价中。鄢文聚等认为“耕地健康产能”是基于对耕地生产能力、生产环境、自我恢复能力及其生产的农产品品质等要素管理而提出的“评价式”概念<sup>[14]</sup>,杨邦杰等提出可应用土地质量地球化学评估成果来指导耕地质量建设和耕地污染防治,确保绿色的耕地产能<sup>[15]</sup>,高丽丽、桑玲玲等将土地质量地球化学评估与农用地分等成果整合,进行了农用地健康产能或绿色产能评价<sup>[16-17]</sup>,李强等基于质量目标、产能目标和土壤环境目标以及能值分析等进行了农用地健康评价<sup>[18]</sup>,赵瑞等以我国粮食主产区河南温县为例进行了耕地健康产能评价<sup>[19]</sup>。

耕地健康产能关系到人类的健康,是维护耕地资源安全和国家生态安全的重要基础。目前有关耕地健康产能的系统性研究还比较少,但随着可持续发展以及人类需求的转变,耕地健康产能的内涵、评价指标体系、评价方法等需要进行深入的探讨。本研究在已有研究的

基础上,将耕地健康产能的内涵界定为:耕地在发挥持续稳定的生产能力的基础上,能够保持和改善生产环境,生产的农产品能促进人类和动植物的健康,同时具有较强的恢复力。本研究从可持续发展目标、耕地功能发挥、耕地要素组成的基础上构建评价指标体系,并以我国某一商品粮基地为例进行实证研究,从而为指导优质健康的耕地优先划入永久基本农田提供一定的借鉴,切实实现耕地保护和可持续发展的目标。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于北纬 31°07′—31°37′,东经 119°31′—120°03′,地势南高北低,西南部为低山丘陵,东部为淩区,北部和西部分别为平原区和低洼圩区。研究区属北亚热带季风气候,全年温暖湿润,年平均气温 15.7℃,年平均无霜期 240 多天,积温 5 418℃,年平均降水量为 1 199.5 mm。该地区的成土母质较为复杂,共有 73 个土种。其中,南部低山地区土壤大多以黄棕壤、红壤为主;西北部高平田土壤以白土为主;中部、U 湖以东一带平田的土壤以黄泥土为主;中西部圩田土壤以乌泥土为主;东部淩区土壤有湖白土、夜潮土、乌滩土等。研究区属农用地质量分等一级指标区的长江中下游区,二级分区属沿江平原区,一年两熟制,基准作物为水稻,指定作物为小麦、水稻。研究区下辖 14 个乡镇和 4 个街道,到 2016 年末,研究区土地总面积为 198 735.42 hm<sup>2</sup>,其中耕地面积 53 057.39 hm<sup>2</sup>。以 2016 年土地利用变更调查数据库中的现状耕地图斑作为评价单元,共有 115 479 个评价单元。

### 1.2 数据来源

本研究所涉及的研究区社会经济统计数据主要来源于《研究区统计年鉴》(2006—2016 年)、《研究区土地利用总体规划(2006—2020 年)》、《研究区“十三五”防洪排涝规划(2017—2020 年)》,土地利用数据主要来源于《研究区 2016 年度耕地质量等别更新评价成果》,土壤属性数据来源于研究区土壤志、《研究区土地质量地球化学评价成果》,2015 年课题组采集了土壤样品 115 个,测定 pH 值、总有机碳、阳离子交换量以及 Cd, Hg, As, Pb, Cu, Zn 等 6 种重金属元素含量,并采集了粮食作物样品 96 个,其中水稻 45 个,小麦 51 个,测定了作物中的重金属含量。2018 年 6

月,再次进行野外调查,补充采集了 100 个土壤样品,主要测定了土壤呼吸、可溶性有机碳、团聚体稳定性。涉及的图件资料主要包括土地利用现状图、行政区划图、遥感影像图、土壤图等。

## 2 评价过程

### 2.1 评价指标体系的构建

耕地资源是由气候、地形地貌、土壤、利用、基础设施、权属等构成的自然经济综合体,人类对耕地的利用和改造赋予了耕地功能的多样性,目前已知的耕地功能主要为生产功能、生态服务功能、景观文化功能等<sup>[20]</sup>,这些功能是客观存在的,功能的不断细化和丰富主要是随着人类社会的发展目标在不断深化。解决温饱问题是人类最原始最基本的需求,在很长一

段时期,人类主要追求耕地的生产功能,这也是耕地发挥其他功能的基础。当温饱问题得到解决,人类所追求的目标由单一转向多层次。人类为了提高耕地的生产能力,在利用过程中不断增加对耕地的投入来换取更高的产量,化肥、农药、机械的过度投入以及人类社会发展所产生的废弃物给耕地带来了巨大的压力,导致了耕地地力降低、耕地污染等问题,农产品品质下降更直接威胁了人类的健康。人类生存的危机意识促使人类从对耕地的利用理念逐步转为保护理念,即追求可持续发展的目标,因此在强调耕地产能的同时,还要密切关注耕地的健康状况,基于与耕地具有密切联系的人类可持续发展目标、耕地功能的发挥、耕地要素三方面构建耕地健康产能的理论框架(图 1)。

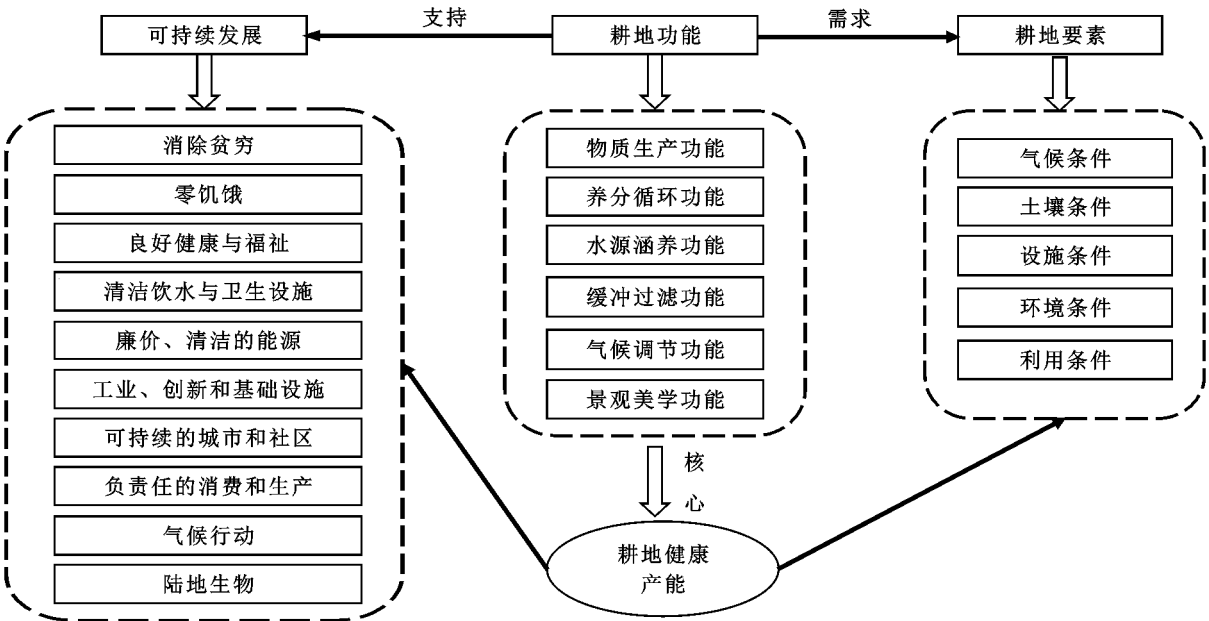


图 1 耕地健康产能理论框架

气候条件、土壤特性等决定了耕地的自然生产能力,灌溉、排水、田块、林网等基础设施的建设以及改良等会进一步影响耕地产能的高低;对耕地健康进行诊断主要是衡量耕地的生产环境以及产出作物品质的好坏,耕地在受到外界干扰后恢复到原有健康水平的能力也是其健康状况的一个重要体现,因此指标体系的构建主要从以上几方面考虑,指标的选取参考了我国现有耕地质量评价相关标准,例如气候条件、土壤特性、技术水平、生产环境等指标的确定主要基于《农用地质量分等规程》(GB/T28407—2012)、《耕地地力调查与质量评价技术规程》(NY/T1634—2008)、《耕地质量等级》(GB/T33469—2016)、《高标准农田建设标准》(NY/T2148—2012)、《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)等。生物活性指标是土壤健康的敏感性指标,目前我国土壤调查监测工作中并没有纳入

生物活性指标<sup>[21]</sup>,考虑到指标的可获取性,生物活性指标参考了康奈尔土壤健康评价选取了土壤呼吸和可溶性有机碳两个指标;作物品质指标的选取根据研究区的实际情况选取农产品重金属超标指标,主要依据《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB2762—2017)测定农产品中重金属元素是否超标;系统弹性指标的选取参考了国内外相关研究,粘质土在干扰后具有很强的自我恢复力<sup>[22]</sup>,土壤阳离子交换量和土壤 pH 负责营养物质的流动性及其对植物的可利用性,阳离子交换量是土壤缓冲性能的主要来源<sup>[23]</sup>,团聚体稳定性能够决定土壤结构的稳定性以及抗侵蚀能力,团聚体稳定性好的土壤更具弹性,对土壤结构的保持具有重要的作用,能够防止土壤板结,抵抗干旱、径流和侵蚀风险,土壤也具有更好的渗透性和储水能力,通常用平均重量直径(MWD)表示,其值越

大表示团聚体平均粒径直径团聚度越高,稳定性越强<sup>[24]</sup>。由此建立研究区耕地健康产能评价指标体系(表 1),指标的分级标准参考上述标准,指标分级没有现行标准的采用自然断点法来实现县域可比。

表 1 研究区耕地健康产能评价指标体系

目标层	准则层	因素层	指标层	权重
耕地健康产能评价	耕地产能评价	气候条件	光温(气候)生产潜力指数	—
			产量比系数	—
			土壤容重	0.08
		土壤特性	表层土壤质地	0.12
			耕作层厚度	0.15
			障碍层类型及距地表深度	0.05
			有机质含量	0.18
			土壤养分元素	0.14
			土壤有益微量元素	0.06
			土壤 pH	0.06
			阳离子交换量	0.07
			土壤侵蚀程度	0.09
		生物活性	土壤呼吸	0.4
			可溶性有机碳	0.6
			灌溉保证率	0.21
	耕地健康诊断	技术水平	排水条件	0.20
			林网化程度	0.11
			田块规模	0.27
			田间道路通达度	0.13
			农田防洪标准	0.08
			团聚体稳定性	0.29
		系统弹性	黏粒含量	0.23
			土壤 pH	0.14
			阳离子交换量	0.22
			粮食年产量变异系数	0.12
		生产环境	灌溉水环境质量	—
			土壤重金属含量	—
		作物品质	作物食用安全性	—

2.2 评价方法

耕地健康产能主要采用加权求和法、“1+X”累加模型、连乘法、叠加法进行评价,采用加权求和法计算的指标,其权重采用层次分析和专家打分法相结合的方式确定。

2.2.1 耕地产能评价 气候条件指耕地所在区域的太阳辐射、温度、降水量等,光温(气候)生产潜力是气候条件适宜的情况下,作物所能达到的最高产量,而土壤特性、技术水平、生物活性的实际情况将会影响作物的产量,因此需要对光温生产潜力进行修正得到耕地产能指数(式 1—2)。

(1) 计算土壤特性、技术水平、生物活性指数。

$$S_n = \sum_{j=1}^m W_j X_{ij} \tag{1}$$

式中: $n=1,2,3$ ;  $S_1$  为土壤特性指数;  $S_2$  为技术水平指数;  $S_3$  为生物活性指数;  $W_j$  为第  $j$  个评价指标的权重;  $X_{ij}$  为第  $i$  个评价单元第  $j$  个评价指标的分值;  $m$  为评价指标的个数。

(2) 计算耕地产能指数。耕地产能指数的计算

采用连乘法来修正光温(气候)生产潜力指数。

$$Y = \alpha \times \beta \times \frac{S_1}{100} \times \frac{S_2}{100} \times \frac{S_3}{100} \tag{2}$$

式中:  $Y$  为耕地产能指数;  $\alpha$  为光温(气候)生产潜力指数;  $\beta$  为作物产量比系数。

2.2.2 耕地健康诊断 耕地的生产环境和作物品质是耕地健康状况的强限制因素,因此将耕地系统弹性指数作为耕地健康的基础,利用生产环境指数和作物品质指数进行修正,得到耕地健康诊断指数。

(1) 计算耕地系统弹性指数。通过加权求和法计算耕地系统弹性指数。

$$R = \sum_{k=1}^q W_k L_{ik} \tag{3}$$

式中:  $R$  为耕地系统弹性指数;  $W_k$  是第  $k$  个指标的权重;  $L_{ik}$  是第  $i$  个评价单元第  $k$  个指标的分值;  $q$  为评价指标的个数。

(2) 计算生产环境指数。生产环境包括土壤重金属和灌溉水环境质量,依据农田灌溉水质标准和土壤环境质量标准首先计算单因素评价指数,然后采用最小限制因子法,土壤重金属污染综合等级和灌溉水



环境质量综合等级等同于单元素划分出的最差等级。采用“1+X”的累加模型,“1”表示没有受到污染的耕地。具体计算方法如式(4—5)所示。

$$P_{水i}=C_{水i}/S_{水i} \tag{4}$$

式中: $C_{水i}$ 为灌溉水中评价指标*i*的实测含量(mg/L); $S_{水i}$ 为GB5084 农田灌溉用水水质基本控制项目标准值(mg/L)。

当 $P_{水i} \leq 1$ 时,表示灌溉水中评价指标*i*含量低于或等于GB5084 标准值,灌溉水环境质量符合标准,等级为1级,得分为0;当 $1 < P_{水i} \leq 2$ 时,表示灌溉水中评价指标*i*含量高于GB5084 标准值,灌溉水环境质量不符合标准,等级为2级,得分为-0.1,当 $P_{水i} > 5$ 时,等级最低,赋-0.4。每个评价单元的灌溉水环境质量综合等级为单元素评价的最差等级。

$$P_{\pm i}=C_{\pm i}/S_{\pm i} \tag{5}$$

式中: $C_{\pm i}$ 为土壤有害重金属*i*的实测含量;*i*为GB15618 土壤环境质量标准中的As,Cr,Cd等8种重金属元素(mg/kg); $S_{\pm i}$ 为土壤有害重金属*i*在GB15618中给出的二级标准值(mg/kg)。土壤重金属污染综合等级的划分与灌溉水环境质量的划分方法一致。

(3) 计算作物品质指数。研究区的主要粮食作物为水稻和小麦,《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB2762—2017)中规定了这两种作物的污染物限量,见表2,由于作物品质与人体健康具有直接关系,因此作物中所有污染物均未超标的情况下,作物才是安全的,而其中某一种污染超标,则视为作物不安全。规定一项污染物超标记为-0.1,两项超标为-0.2,以此类推。用“1+X”的累加模型计算作物食用安全性综合得分。

表 2 作物污染物限量标准

作物种类	污染物种类	限量要求/(mg·kg <sup>-1</sup> )
稻米	Hg	≤0.02
	Cd	≤0.2
	As	≤0.2
	Pb	≤0.2
	Cr	≤1
小麦	Hg	≤0.02
	Cd	≤0.1
	As	≤0.5
	Pb	≤0.2
	Cr	≤1

(4) 耕地健康诊断指数。通过连乘积法计算耕地健康诊断指数。

$$Z=R \times E \times Q \tag{6}$$

式中: $Z$ 是耕地健康诊断指数; $R$ 是耕地系统弹性指

数; $E$ 是生产环境指数; $Q$ 是作物品质指数。

2.2.3 划定耕地健康产能等级 用ArcGIS 自然断点法把研究区的耕地产能指数分为一等、二等、三等;耕地健康诊断指数分为健康,亚健康,不健康;采用叠加法将耕地产能评价结果和耕地健康诊断结果叠加得到耕地健康产能评价结果,将结果划分为9个级别。耕地健康产能从1级到9级,级别逐渐降低。例如1级耕地表示耕地产能为一等,耕地健康状态为健康的耕地;9级耕地表示耕地产能为3等,耕地健康状态为不健康的耕地。

3 结果与分析

3.1 耕地产能评价结果

按照《农用地质量分等规程(GB/T28407—2012)》确定研究区的标准耕作制度为:小麦—水稻,复种类型为一年两熟,基准作物为水稻,指定作物为水稻、小麦,光温生产潜力为水稻1 977,小麦930,产量比系数为水稻1,小麦1.3。按照耕地产能评价方法计算,研究区耕地产能指数在947.96~2 314.99之间,其中二等的耕地面积最大,为25 596.87 hm<sup>2</sup>,占耕地总面积的48.24%,其次为一等地,面积为15 413.56 hm<sup>2</sup>,占总面积的29.05%,三等地的面积最少,面积为12 046.96 hm<sup>2</sup>,占总面积的22.70%。

由研究区耕地产能评价空间分布图(图2)可以看出,研究区的耕地产能呈现出由东北地区向西南地区逐渐降低的趋势,一等地主要分布在研究区东北部的M镇、I镇、J镇、N镇等地,这些地区地势较为平坦,主要以黄泥土为主,剖面无障碍层次,质地偏粘,肥力较高,是研究区的高产土壤,此外这些地区生物活性较高,基础设施完善,生产和管理条件较为便利。二等地大部分分布在E镇、G镇、F镇等地,土壤类型方面主要以白土为主,质地中壤,部分白土易淀浆板结,且容易缺磷、钾和有机质,如果在耕作过程中注意施肥和改良,也能获得高产;在生物活性方面,这些地区的土壤呼吸和可溶性有机碳在县域处于中等偏上的水平;在基础设施方面,这些地区的林网化程度、田块规模等条件一般,还需要进一步完善。三等地主要分布在研究区西南部的B镇、C镇、P镇等地,西南部地势起伏,丘陵较多,土壤类型主要为黄棕壤和红壤,pH值偏低,质地较粘,该地区土壤养分元素中钾元素和磷元素含量也整体偏低,土壤受到侵蚀后,肥力下降较为严重,这些地区土壤呼吸速率和可溶性有机碳含量都偏低,且灌溉保证率较低,排水条件差。

3.2 耕地健康诊断结果

按照耕地健康诊断方法计算,得到研究区耕地健

康诊断指数。将研究区耕地健康诊断结果分为健康、亚健康、不健康 3 个级别。其中亚健康的耕地面积最大,为 23 553.01 hm<sup>2</sup>,占全市耕地总面积的 44.39%;其次是健康的耕地,面积为 18 523.62 hm<sup>2</sup>,占耕地总面积的 34.91%;不健康的耕地面积最少,为 10 980.77 hm<sup>2</sup>,占耕地总面积的 20.70%。

由研究区耕地健康诊断空间分布图(图 3)可以看出,以 L 镇连接 D 镇为分界线,分界线左侧多为健康和亚健康的耕地,分界线以下不健康的耕地较多。健康的耕地主要分布在研究区西北部的 E 镇、G 镇、东北部的 L 镇、N 镇和 M 镇也有少量分布,这些地区的耕地 pH 值和阳离子交换量级别高,土壤的缓冲过滤性能好,黏粒含量高,团聚体稳定性好,耕地的弹性指数高,健康的耕地生产环境和作物品质良好,基本没有污染或轻微污染;亚健康的耕地在各乡镇均有分布,主要分布在 E 镇、I 镇、J 镇等地,这些地区的耕地由于受到团聚体稳定性的影响导致系统弹性指数不高,部分地区的生产环境和作物品质受到轻微污染;不健康的耕地主要分布在 P 镇和 B 镇,其中 P 镇有 90% 的耕地都处于不健康的状态,M 镇、O 镇等 S 湖沿岸部分地区也有不健康的耕地分布,这些地区耕地不健康的主要影响因素是土壤重金属污染严重,主要超标元素是镉元素,且镉元素很容易在稻米中富集,因此导致作物品质也较差,此外,由于土壤的团聚体稳定性和阳离子交换量较低,会影响土壤的抵抗能力和恢复能力,不健康的耕地自身难以恢复到健康的状态。

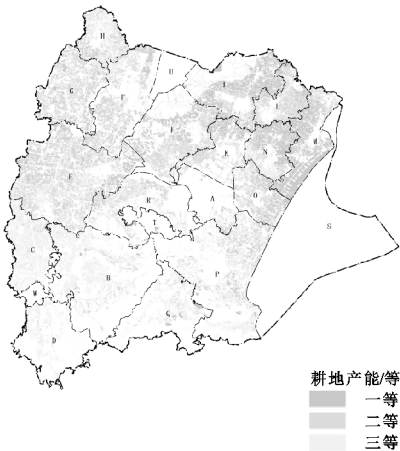


图 2 研究区耕地产能评价空间分布

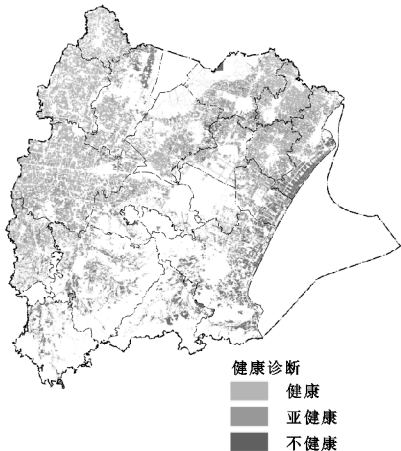


图 3 研究区耕地健康诊断空间分布

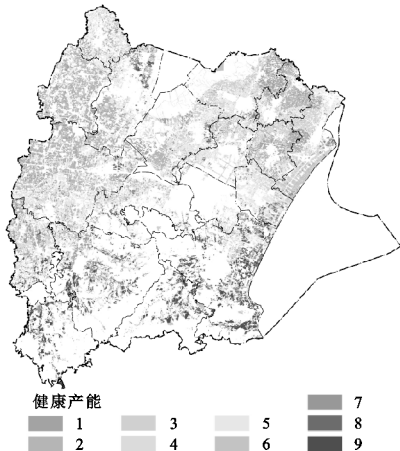


图 4 研究区耕地健康产能评价空间分布

## 4 结论与讨论

(1) 本研究从耕地生产能力、生产环境、恢复力、对人类和动植物健康的影响方面界定了耕地健康产能的内涵,并基于耕地产能评价和耕地健康诊断构建了耕地健康产能评价指标体系,其中耕地产能评价考虑了气候条件、土壤特性、生物活性、技术水平;耕地

## 3.3 耕地健康产能评价结果

将研究区耕地产能评价结果和耕地健康诊断结果叠加得到研究区耕地健康产能评价结果。研究区耕地健康产能状况整体来看相对良好,为了体现健康产能之间的差异性,将 1 级、2 级和 3 级的耕地健康产能归为优质产能,面积为 23 721.98 hm<sup>2</sup>,占总面积的 44.71%;将 4 级、5 级和 6 级的耕地健康产能归为一般产能,面积为 15 232.00 hm<sup>2</sup>,占总面积的 28.71%;将 7 级、8 级和 9 级的耕地健康产能归为低质产能,面积为 14 103.41 hm<sup>2</sup>,占总面积的 26.58%。

由研究区耕地健康产能评价空间分布图(图 4)可以看出,其级别的分布趋势与耕地健康诊断的结果具有相似性,优质产能主要分布在研究区的 G 镇、E 镇北部、I 镇、L 镇和 N 镇等地,这些地区的土壤条件好,基础设施完善,且生产环境良好,生产的作物品质较高,耕地的抵抗力和恢复力强;一般产能主要分布在 E 镇南部、C 镇、M 镇等研究区中部地区,包括产能高但不健康、健康但产能低以及产能和健康程度都一般的耕地,例如 M 镇位于 S 湖沿岸的耕地产能等较高,但由于土壤和作物污染,弹性较差,叠加健康诊断后,耕地健康产能级别降低;低质产能主要分布在研究区南部和 S 湖沿岸的乡镇,这些地区多为丘陵,土壤养分含量低,灌溉、排水条件差,导致产能较低,又由于研究区产业结构的影响,一些陶瓷厂、化工厂所产生的废水、废料,污染了当地的土壤和水源,不仅破坏了生产环境,还造成农产品中污染元素超标,作物品质降低。

健康诊断考虑了耕地系统弹性、生产环境和作物品质。在此基础上,采用加权求和法、“1+X”累加模型、连乘法、叠加法等方法,对我国某商品粮基地进行了实证研究,评价结果能够反映研究区耕地的实际健康产能状况,评价指标体系和评价方法具有一定的合理性和科学性。

(2) 本次研究将可溶性有机碳和土壤呼吸这两

个生物指标应用到县域尺度进行评价,已有研究表明水田的可溶性有机碳和土壤呼吸高于旱地,但在本次研究中,土壤呼吸所呈现的规律并不明显,因此该指标还需要通过其他方式来验证在县域尺度的可行性,例如可采取原位测定的方法来减小误差。

(3) 耕地健康可持续发展是保证粮食安全的重要内容,耕地健康产能是耕地产能的升级,对耕地健康产能评价理论进行研究,对于落实耕地数量、质量、生态“三位一体”保护以及永久基本农田划定具有重要意义。本次研究仅探索建立了县域耕地健康产能评价指标体系,未来还需研究不同尺度的耕地健康产能评价指标体系,建立完善的调查和监测系统,以识别不同区域的耕地产能问题和健康问题,并采取相应的整治措施来提升耕地健康产能。

#### 参考文献:

- [1] Maggio A, Crieckinge T V, Malingreau J P. Global food security: assessing trends in view of guiding future EU policies[J]. *Foresight*, 2016, 18(5): 551-560.
- [2] Guelph U O, Smit B, Waltnertoews D, et al. Agroecosystem health: analysis and assessment[J]. *World Economy*, 1998, 25(4): 563-589.
- [3] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 3-11.
- [4] Pankhurst C E, Hawke B G, McDonald H J, et al. Evaluation of soil biological properties as potential bioindicators of soil health[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1995, 35(7): 1015-1028.
- [5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning[M]. United States: Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [6] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1997.
- [7] Acton D F, Gregorich L J. Executive summary of the health of our soils toward sustainable agriculture in Canada [C]. Research Branch: Centre for Land and Biological Resources Research, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Canada, 1996.
- [8] Fine A K, Van E H M, Schindelbeck R R. Statistics, scoring functions, and regional analysis of a comprehensive soil health database[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(3): 589-601.
- [9] Mueller L, Schindler U, Shepherd T G, et al. The Muencheberg soil quality rating for assessing the quality of global farmland // Novel Measurement and Assessment Tools for Monitoring and Management of Land and Water Resources in Agricultural Landscapes of Central Asia[M]. Springer International Publishing, 2014.
- [10] 鄢文聚,王洪波,王国强,等.基于农用地分等与农业统计的产能核算研究[J].*中国土地科学*, 2007, 21(4): 32-37.
- [11] 伍育鹏,鄢文聚,邹如.耕地产能核算模型的研究[J].*农业工程学报*, 2008, 24(S2): 108-113.
- [12] 吴克宁,程先军,黄勤,等.基于分等成果的农用地综合生产能力[J].*农业工程学报*, 2008, 24(11): 51-56.
- [13] 吕慧敏,吴克宁,周勇,等.基于农用地分等的耕地质量主导限制型研究[J].*中国农业资源与区划*, 2015, 36(7): 11-18.
- [14] 鄢文聚,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, 4(3): 22-23.
- [15] 杨邦杰,鄢文聚,程锋.论耕地质量与产能建设[J].*中国发展*, 2012, 12(1): 1-6.
- [16] 高丽丽.土地质量地球化学评估与农用地分等整合方法及成果应用研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2011.
- [17] 桑玲玲,张晓沛,杨建宇,等.农用地绿色产能评价体系构建及实证分析[J].*农业工程学报*, 2010, 26(7): 235-239, 389.
- [18] 李强,赵焯,严金明.城市化驱动机制下的农用地健康评价[J].*农业工程学报*, 2010, 26(9): 301-307.
- [19] 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.
- [20] 孔祥斌,张蚌蚌,温良友,等.基于要素—过程—功能的耕地质量理论认识及其研究趋势[J].*中国土地科学*, 2018, 32(9): 14-20.
- [21] 张心昱,陈利顶.土壤质量评价指标体系与评价方法研究进展与展望[J].*水土保持研究*, 2006, 13(3): 30-34.
- [22] Bonetti J D A, Anghinoni I, Moraes M T D, et al. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 174(12): 104-112.
- [23] Ketterings Q M, Gami S K, Mathur R R, et al. A Simple method for estimating effective cation exchange capacity, cation saturation ratios, and sulfur across a wide range of soils[J]. *Soil Science*, 2014, 179(5): 230-236.
- [24] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels[J]. *Catena*, 2002, 47(2): 133-149.