

DOI: 10.11766/trxb202006160306

杨颖, 郭志英, 潘恺, 王昌昆, 潘贤章. 基于生态系统多功能性的农田土壤健康评价[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 461–475.

YANG Ying, GUO Zhiying, PAN Kai, WANG Changkun, PAN Xianzhang. Farmland Soil Health Assessment Based on Ecosystem Multi-functionality[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 461–475.

## 基于生态系统多功能性的农田土壤健康评价\*

杨颖<sup>1, 2, 3</sup>, 郭志英<sup>2, 3</sup>, 潘恺<sup>2, 3</sup>, 王昌昆<sup>2, 3</sup>, 潘贤章<sup>2, 3†</sup>

(1. 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 农田土壤健康状况不仅影响作物产量和品质, 还影响大气、水环境质量和生物安全, 因而农田土壤健康评价应将土壤生产能力与生态环境效应结合考虑。基于土壤生态系统多功能性, 将土壤功能归纳为作物生产、持水净水、养分运移与缓冲、碳固存及栖息地与多样性等 5 项功能。进一步针对每项功能, 按照固有属性和动态属性两个方面分别选取基础项指标, 同时考虑具有区域特点的威胁土壤功能发挥的限制项指标, 并采用 2 个乘数来体现限制因子对固有和动态属性影响的差异性, 共同构建农田生态系统土壤健康评价指标体系。以中国生态系统研究网络(CERN)内位于黄淮海平原的封丘、栾城和禹城 3 个实验站典型农田生态系统为例, 应用所建立的指标体系, 采用灰色关联分析法对其土壤健康状况进行综合评价。结果显示, 3 个农业生态实验站土壤健康状况总体相当且处于较高水平, 但仍有所差异, 表现为禹城>栾城>封丘, 且作物生产功能与产量  $R^2$  达到 0.60, 验证表明该评价体系比较合理。因此, 基于多功能性的土壤健康评价方法可为进一步探究土壤健康长期变化趋势, 实施土壤资源有效管理提供一定参考。

**关键词:** 土壤健康评价; 土壤功能; 农田生态系统; 黄淮海平原; 灰色关联分析

**中图分类号:** S159.2      **文献标志码:** A

## Farmland Soil Health Assessment Based on Ecosystem Multi-functionality

YANG Ying<sup>1, 2, 3</sup>, GUO Zhiying<sup>2, 3</sup>, PAN Kai<sup>2, 3</sup>, WANG Changkun<sup>2, 3</sup>, PAN Xianzhang<sup>2, 3†</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** [Objective] Soil is an important carrier of cultivated land and the basis of agro-ecosystems. Farmland soil health not only affects crop production and food quality, but also regulates local climate and water environment quality, and sustains biological safety. Therefore, the assessment of farmland soil health should take into account both soil productivity and eco-environment effects. As a living ecosystem, soil varies in health status region, time and management practice. A reasonable

\* 中国科学院野外站联盟项目(KFJ-SW-YW035-3)和科技部基础专项项目(2015FY10700)资助 Supported by the Field Station Alliance Project of Chinese Academy of Sciences (No. KFJ-SW-YW035-3) and the National Basic Work of Science and Technology of China (No. 2015FY10700).

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: panxz@issas.ac.cn

作者简介: 杨颖(1995—), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要研究领域为土壤质量与健康评价。E-mail: asyy1122@126.com

收稿日期: 2020-06-16; 收到修改稿日期: 2020-11-01; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-01-13

assessment index system and a set of evaluation methods are the premise and foundation of soil health assessment. The aim of this study was to gain a deeper understanding of the connotations of soil function and soil health, and to explore the actual state of farmland soil health in China. 【 Method 】 In this paper, the Fengqiu, Luancheng and Yucheng ecological experiment stations in the Huang-Huai-Hai Plain, the most important grain producing area in China, were selected as objects for the study. Soil functions were generalized into five groups: crop production, water holding and purification, nutrient transport and buffering, carbon sequestration, and habitat and diversity. By referring to the German Müncheberg index scheme, evaluation indices were divided into basic ones and hazard ones. Out of each function, basic indices were selected in the light of their attributes, inherent or dynamic, separately, and got combined with region-specific restricting indices that might threaten soil functions to form a soil health assessment index system for agro-ecosystems. Among basic indices, the inherent attributes were classified or selected from climate, topography, hydrology and soil conditions, and the dynamic attributes were divided into three aspects including physical, chemical and biological indices. On considering that the restricting indices impact their inherent and dynamic properties to varying extent, two multipliers were defined for the two separately. In the end, based on the established soil health assessment index system, soil health of the three typical agro-ecosystems were assessed using the gray correlation analysis method. 【 Result 】 Results show: (1) The three agricultural ecological experiment stations all gained quite high soil health scores in the assessment, but still differed slightly, showing an order of Yucheng > Luancheng > Fengqiu; (2) Farmland management methods also affect soil health, so the farmlands with no fertilizer applied were certainly lower than fertilized ones in productivity; in the Yucheng station, No. 2 auxiliary plot applied with fertilizer and straw was the highest in soil health score among all the comprehensive and auxiliary observation fields; and (3)  $R^2$  between the crop production function and the maize yield reached 0.60. 【 Conclusion 】 (1) On the whole, the typical farmlands of the Huang-Huai-Hai Plain are fairly good in soil health, displaying an order of Yucheng > Luancheng > Fengqiu. (2) By referring to the Müncheberg index scheme, the revised soil health assessment framework has assigned different multipliers to the inherent and dynamic properties, which proves to be quite reasonable. So the multi-functionality-based soil health assessment system may serve as reference for further exploring trends of long-term evolution of soil health, and implementing effective management of soil resources.

**Key words:** Soil health assessment; Soil function; Agro-ecosystems; Huang-Huai-Hai Plain; Gray correlation analysis

土壤是耕地的重要载体,是农田生态系统的基础,土壤健康状况直接影响着人类生产、生活和生态系统的完整性与健康水平。早期人们主要关注土壤的生产性能<sup>[1]</sup>,以及如何保护土壤并提高产能。后来,人们逐渐认识到土壤具有多功能性,认为土壤系统同时具有维持动植物生产力,改善水体和大气环境质量,以及保证人畜健康和生态安全的功能<sup>[2-3]</sup>。欧盟《土壤框架指令》定义了7项土壤功能:食物和生物量生产,储存和过滤及转化,生物栖息地与基因库,人类生活的物理和文化环境,原材料来源,碳库,以及地质和考古遗产档案等<sup>[4-5]</sup>,引发了公众对土壤功能内涵的广泛关注。联合国粮农组织(FAO)总结了土壤的11项功能:提供食物纤维和燃料、过滤水和消解污染物、养分循环、生物栖息地、碳固定、气候调节、洪水调节、文化遗产、药品和基因资源的来源等<sup>[6]</sup>。梁思源和吴克宁<sup>[7]</sup>将土壤功能划分为作物生产、环境交互、动植物栖息地、

人居环境、原材料供给、自然文化历史档案等。而土壤生态系统功能则指与生态系统功能和服务密切相关的功能,包括生物、水文、养分循环、碳固存、支撑、过滤和缓冲等<sup>[8]</sup>,本文简称为土壤功能。

基于土壤功能的概念,学者们对土壤质量进行了定义:在自然或人为生态系统边界内,特定土壤发挥功能的能力,这些功能包括维持植物和动物生产力,保持和改善水及大气质量,支撑人类健康和栖息地<sup>[2, 9]</sup>。土壤质量概念最早出现于20世纪70年代<sup>[10]</sup>,80年代至90年代成为研究热点,应用非常广泛。土壤质量是对土壤肥力概念(与土壤生产力直接相关)的发展,是对土壤功能更全面的描述和评估<sup>[11]</sup>。我国于1999—2004年开展了第一项土壤973项目“土壤质量演变规律与持续利用”,对土壤质量概念进行了进一步发展,提出土壤质量应包括肥力质量、环境质量和健康质量3个方面<sup>[12]</sup>,自此,国内开始关注土壤生态环境相关的功能。加之

我国土壤污染问题逐步显现，促使科研人员越来越重视土壤健康问题。

土壤健康最先是与土壤污染紧密联系的一个概念。后来，人们将土壤作为一个充满生命的生态系统，认为它在不同区域、不同时间和不同管理方式下具有不同的健康状态，就像人类那样具备某种健康状况<sup>[1]</sup>，这种理解进一步拓展了土壤健康内涵。基于这样的认识，土壤健康被定义为土壤作为活的生态系统所具备的能力，用以维持植物、动物和人类生存和发展<sup>[13]</sup>。我国国家标准《耕地质量等级 (GB/T 33469-2016)》对土壤健康状况也进行了定义：“土壤作为一个动态生命系统具有维持其功能的持续能力，用清洁程度、生物多样性表示。”在概念上与国际通用认识基本一致。从定义来看，土壤健康与土壤质量概念有很大的重叠部分，国外经常将 2 个词混用，但也有一定区分，其中研究人员偏向使用“土壤质量”，而农民偏向使用“土壤健康”<sup>[14-15]</sup>。本文统一表达为“土壤健康”。

近年来，土壤健康问题愈发受到关注。Calzolari 等<sup>[16]</sup>以意大利北部冲积平原土壤为例，从土壤生物栖息地、养分与污染物的保持和释放、微气候调节、固碳潜力、粮食供应、径流和洪水调节等 8 个土壤功能维度，展现了不同土壤对于生态系统服务多重贡献性的差异。Rachman<sup>[17]</sup>根据各土壤参数的不同功能、获取成本、数据可用性等因素，针对印度尼西亚这个国家，选取了 13 个评价指标，计算其土壤健康指数，衡量土壤在何种程度上能够发挥其特定功能。

构建科学合理的评价指标体系和评估方法是进行土壤健康评价的前提和基础。由于不同国家和地区的自然和社会经济条件存在巨大差异，评价目的和研究尺度也不尽相同，因而指标体系和方法会呈现差异化、地域化的特点。南澳大利亚州采用了限制性分类系统，以限制因子和限制性程度相结合的方式设定农用地分类标准<sup>[18]</sup>。德国 Müncheberg 评价系统兼顾了土壤的基本特性和威胁指标的影响，并以基本指标的加权分值和威胁乘数的乘积划分等级<sup>[19]</sup>。我国农业农村部（原农业部）全国农业技术推广服务中心等单位制定的《耕地质量等级 (GB/T 33469-2016)》国家标准中涉及了土壤健康状态的概念，该标准使用清洁程度、生物多样性指标来表征土壤健康状况，其中“清洁程度反映了土壤受重金

属、农药和农膜残留等有毒有害物质影响程度”，而“生物多样性反映了土壤生命力丰富程度”，但是这 2 个指标实际使用起来难以量化，并且过多关注与污染相关的功能，对土壤健康的表征不全面。从国家层面而言，目前我国尚缺乏土壤健康评价方法和标准体系。

改革开放以来，由于耕地土壤利用强度的进一步加大以及化肥、农药等外源物质的大量投入，不仅土壤自身出现质量退化问题，同时土壤环境也受到威胁。因此，不断恢复和保持土壤的最佳功能，提高土壤健康水平是农业生产中需要重点关注的方向。黄淮海平原作为我国重要的粮食主产区和农业经济区，对于保障我国粮食自给和粮食安全具有重要意义。本文旨在构建基于土壤多重功能的黄淮海平原土壤健康评价指标体系，并提出综合评价方法，从而进一步对该区域典型农田生态系统土壤健康现状进行评价，也为后续探究该区域土壤健康长期变化规律，以及实施土壤资源精准管理提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄淮海平原是中国第二大平原，大致位于 113°~121°E, 32°~40°N。西起太行山、秦岭东麓，东临渤海、黄海、山东丘陵，北起燕山，西南至桐柏山、大别山，东南至苏皖北部，主要由黄河、淮河、海河和滦河冲积而成。在行政区域上涉及北京市、天津市、山东省、河北省、河南省、江苏省和安徽省等 5 省 2 市，面积超过 30 万 km<sup>2</sup>。该区域属暖温带半湿润大陆性季风气候区，地形平坦，水、光、热资源配置总体较好，以潮土、棕壤和褐土为主，耕性良好，农业生产条件优越<sup>[20]</sup>。主要粮食作物有小麦、玉米等，经济作物有棉花、花生等。该平原耕作历史悠久，各类自然土壤已熟化为农业土壤，土层深厚，利用、改造潜力大。该区域是我国人口、城市密集区和工农业较为发达的地区，交通便利，经济发展较快，但也因此引发一系列土壤生态环境问题<sup>[21]</sup>。

本研究选取该区域具有代表性的河南封丘、河北栾城和山东禹城等 3 个野外生态实验站的农田生态系统土壤健康作为评价对象（图 1）。其中，封丘站位于黄河中下游北岸，属冀鲁豫低洼平原农业区，

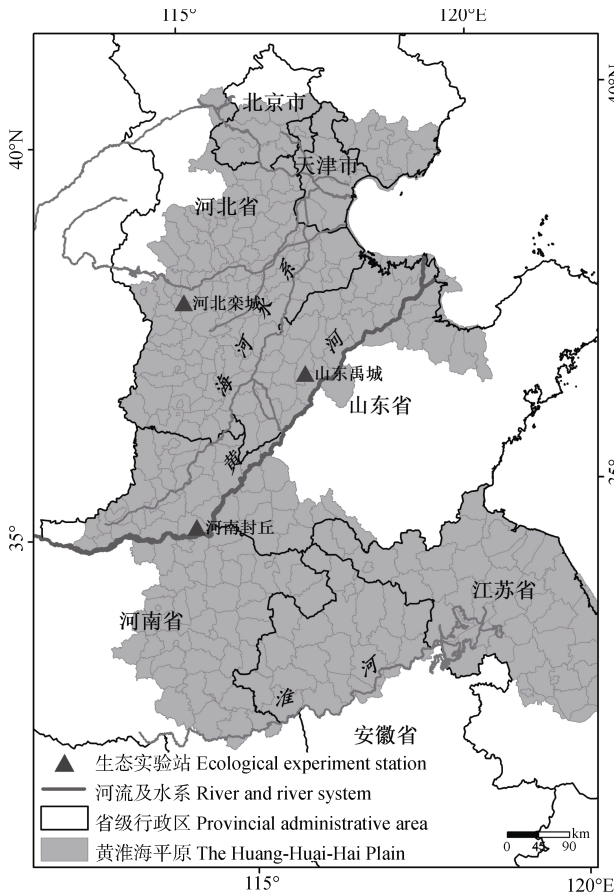


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

土壤类型主要为黄河冲积物发育的黄潮土(中国土壤系统分类<sup>[22]</sup>中的淡色潮湿锥形土),实行冬小麦-夏玉米一年两熟种植制度。栾城站地处太行山山前平原,属海河流域子牙河水系,农作物为冬小麦-夏玉米一年两熟轮作,代表黄淮海平原北部潮褐土(系统分类中的斑纹筒育干润淋溶土)集约高产的农业生

态类型。禹城站位于黄河下游,地貌类型为黄河冲积平原,土壤母质为黄河冲积物,以典型潮土或盐化潮土(系统分类中的淡色潮湿锥形土和弱盐淡色潮湿锥形土)为主。种植模式为冬小麦-夏玉米一年两熟,代表黄淮海平原河间浅平洼地农业生态类型。

## 1.2 数据来源

农田生态系统土壤监测数据主要来自于中国生态系统研究网络(CERN)。CERN自1988年组建以来,逐步形成了由农田、森林、草地、荒漠、沼泽、湖泊、海湾等生态系统类型共44个生态站以及土壤、水分、大气、生物、水体5个学科分中心和1个综合中心构成的生态网络体系,其中陆地生态站有37个,包含16个农田生态站。CERN已经实现了野外观测和实验数据的不断积累,对土壤肥力、环境和生物指标进行了长期监测,具有比较系统、完整的数据集,为开展我国长期生态学监测与综合研究提供了很好的数据支撑。本文农田监测数据资料采用CERN河南封丘站、河北栾城站和山东禹城站的2017年长期采样地观测数据,其中包括综合观测场、辅助观测场的长期监测样地和站区调查点等。土壤数据来源于国家地球系统科学数据共享平台土壤科学数据中心(<http://soil.geodata.cn/>),生态站气象数据、生物指标、环境指标来源于国家生态科学数据中心资源共享服务平台(<http://www.cern.org.cn/>),DEM采用SRTM 90 m数据,干燥度数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心的气象背景数据集,砾石含量和微生物丰度数据来源于中欧合作项目iSQAPER(<http://www.isqaper-project.eu/>)。相关数据的获取方式或测定方法汇总于表1。

表1 相关数据获取方法

Table 1 Sources and acquisition methods of relevant data

指标 Index	获取方式/测定方法 Acquisition method/Measurement method	指标 Index	获取方式/测定方法 Acquisition method/Measurement method
≥10℃积温	根据生态站逐日气温数据计算	全氮	半微量开氏法
年降水量	生态站气象观测数据	全磷	硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法
干燥度	潜在蒸发与降水量比值	全钾	氢氧化钠碱熔-火焰光度法
年均温	生态站气象观测数据	碱解氮	碱解扩散法
海拔高度	DEM数据、实地调查	速效磷	碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法
坡度	DEM数据、实地调查	速效钾	乙酸铵浸提-火焰光度法
坡向	DEM数据、实地调查	CEC	乙酸铵交换法、EDTA-铵盐快速法

续表

指标 Index	获取方式/测定方法 Acquisition method/Measurement method	指标 Index	获取方式/测定方法 Acquisition method/Measurement method
坡位	DEM 数据、实地调查	pH	电位法
地下水埋深	水文监测数据	容重	环刀法
排水性	实地调查与评估	孔隙度	吸力平板法、计算法
成土母质	实地调查与评估	田间持水量	田间测定、室内测定
表层质地	吸管法、激光粒度仪	有效含水量	田间持水量与凋萎系数差值
土体厚度	实地调查与评估	饱和导水率	环刀法
矿物类型	实地调查与评估	最大扎根深度	实地调查
剖面构型	实地调查与评估	根生物量	土钻法
砾石含量	筛重法、环刀法	微生物生物量碳氮	氯仿熏蒸浸提法
团聚体稳定性	湿筛法	微生物多样性	培养法、非培养法
表层土温	土壤温度计	土壤呼吸	气室法、微气象学法
有机质	重铬酸钾氧化-外加热法	蚯蚓丰度	样方徒手分离法

### 1.3 土壤健康评价的总体框架

本研究土壤健康评价总体框架参考德国 Müncheberg 评价系统 (M-SQR)<sup>[23]</sup>, 将评价指标分为 2 大类: 基础项指标和限制项指标, 如图 2 所示。其中, 基础项指标是指与土壤肥力、环境、健康和作物生长有关的指标, 其选取主要依赖土壤功能。根据“1+4”分类方案<sup>[24]</sup>, 将土壤功能归纳为 5 类: 作物生产功能、持水净水功能、养分运移与缓冲功能、碳固存能力以及栖息地与多样性功能。每项功能均包括受自然成土因素影响的、相对稳定的固有 (Inherent) 属性, 以及由于人类使用、管理而发生变化的动态 (Dynamic) 属性<sup>[25-26]</sup> 2 个部分。而限制项指标是指妨碍作物正常生长发育或严重限制土壤功能发挥的指标, 比如土壤侵蚀、土壤污染等。基础项指标之间是加和关系, 而限制项指标属于乘性关系。显然, 限制项指标对于土壤固有属性和动态属性的影响程度不同, 如果使用同一个乘数无法体现这种差异, 所以本文采用了 2 个乘数来计算土壤健康值。由此可见, 利用这种框架对土壤健康进行评价时, 既能基于基础项指标反映土壤的基础功能, 又能通过限制项指标体现限制性因子的影响, 因而具有较大的适用性。

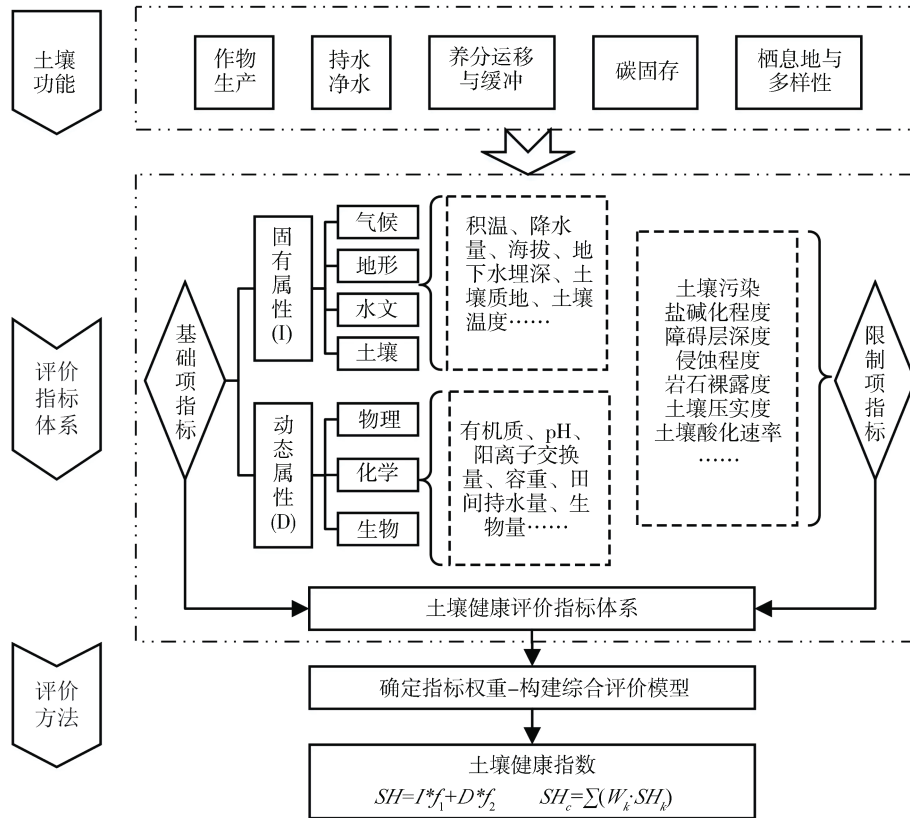
针对基础项中的固有属性指标, 从气候、地形、水文和土壤本身等条件划分和选取, 对于动态属性指标, 则分为物理指标、化学指标和生物指标 3 方

面。限制项指标对固有和动态属性的影响程度分别以乘数  $f_1$  和  $f_2$  表征, 每次评价时, 取限制项指标中的最小乘数与土壤健康基础分值相乘, 并将固有属性和动态属性评分相加, 得到待评价对象不同功能的土壤健康评分  $SH$ , 进一步计算得出土壤健康综合得分值  $SH_c$ 。

### 1.4 评价指标的选取

影响土壤健康状况的因素众多, 建立的指标体系须立足于综合、全面、系统的原则, 且应选取有代表性、影响较大的指标。此外, 也要考虑数据的可获得性和可量化性。指标数据可以通过实地观测得到, 或者可以从其他可靠的途径获取, 如统计年鉴、普查数据、权威机构的数据产品等, 以保证评价结果的客观性和科学性。

按照 1.3 总体框架, 本研究设定了一套评价指标体系 (表 2)。其中, 固有属性主要包括气候、地形、水文和土壤 4 个方面。考虑到气候和地形因子是影响土壤形成和发育的重要立地和环境条件, 所以本文选取了与农业生产密切相关的积温、年降水量、年均温和干燥度等气候指标, 以及海拔、坡度、坡向、坡位等地形指标, 来表征研究区水热状况和地形地貌特征对于土壤健康的指示作用。水文因子选取地下水埋深和排水性等指标, 用于衡量供水和排水能力。土壤指标参考 Vogel 等<sup>[24]</sup>和梁思源和吴克宁<sup>[7]</sup>的研究, 选取成土母质、表层质地、土体厚



注:  $f_1$ 、 $f_2$  分别表示限制项指标对固有属性和动态属性影响的乘数,  $W_k$  指各功能的权重。Note:  $f_1$  and  $f_2$  are multipliers the restricting indices render on inherent and dynamic properties, respectively.  $W_k$  represents the weight of each function.

图 2 土壤健康评价的总体框架

Fig. 2 General framework of the soil health assessment scheme

度、土壤矿物类型、剖面构型、砾石含量、团聚体稳定性和表层土温等评价指标。

土壤动态属性按照物理、化学和生物学 3 大类去选取。参照 USDA<sup>[27]</sup>、Novák 等<sup>[28]</sup>、Larson 和 Pierce<sup>[29]</sup>、陈梦军等<sup>[30]</sup>的研究, 化学指标选取有机质含量、全氮、全磷、全钾及速效含量、阳离子交换量 (CEC)、pH 等; 物理指标包括土壤容重、孔隙度、田间持水量、有效含水量、饱和导水率、扎根深度等; 生物指标则包括根生物量、微生物生物量碳氮、微生物多样性、土壤呼吸、蚯蚓丰度等。

随着人类对土壤资源的不断开发和利用, 土壤功能将不可避免地受到一定程度的损害。人类活动引发的危害和气候、地形等自然要素相互作用, 会加速土壤退化, 威胁生态平衡<sup>[31]</sup>。如果土体中存在重金属含量超标、盐碱化程度过强、农药农膜残留过多等问题, 会严重影响土壤健康水平, 导致作物产量降低、农产品质量下降、生物多样性减少以及

人体健康风险。考虑到限制项指标对土壤功能的重要影响, 本文参考 Glæsner 等<sup>[5]</sup>和 Mueller 等<sup>[19]</sup>的研究, 选用土壤污染、盐碱化程度、侵蚀程度、障碍层深度、岩石裸露程度、酸化速率、压实程度、旱涝灾害敏感性、农药农膜残留量等指标作为土壤健康限制因子。

各项土壤功能的评价指标设置详述如下:

(1) 作物生产功能。生产功能是人类很早就认识的一项土壤功能, 研究区水热条件、地形地貌、成土因素和人类活动对土壤生产功能均具有至关重要的影响。良好的水热条件可以满足作物生长的需要, 地形地貌特征既能影响局地小气候, 又能影响农业生产的难易程度。适宜的地下水位以及良好的土壤排水性能可以改善作物的生长环境, 提升粮食生产水平。成土因素决定着土壤耕性的好坏, 是土壤利用和管理的重要依据。人类活动对耕地土壤的管理主要是通过不同耕作方式和施肥处理来改善土

表 2 土壤健康评价指标体系

Table 2 Soil health assessment index system

基础项指标	评价指标	土壤功能					评价指标	基础项指标	
		作物生产	持水净水	养分运移和缓冲	碳固存	栖息地和多样性			
固有属性	气候	≥10℃ 积温						有机质	动态属性
		年降水量						全氮	
		干燥度						全磷	
		年均温						全钾	
	地形	海拔高度						碱解氮	
		坡度						速效磷	
		坡向						速效钾	
		坡位						CEC	
	水文	地下水埋深						pH	
		排水性						容重	
	土壤	成土母质						孔隙度	
		表层质地						田间持水量	
		土体厚度						有效含水量	
		矿物类型						饱和导水率	
		剖面构型						最大扎根深度	
		砾石含量						根生物量	
		团聚体稳定性						微生物生物量碳氮	
表层土温							微生物多样性		
						土壤呼吸			
						蚯蚓丰度			
限制项指标	土壤污染 障碍层深度 土壤压实程度						土壤盐碱化程度 岩石裸露程度 早涝灾害敏感性	土壤侵蚀程度 土壤酸化速率 农药农膜残留量	

注：有纹理填充的方框，表示将该属性作为评估相应土壤功能的指标，纳入农田生态系统土壤健康评价指标体系。其中，斜线填充对应于表格左侧的固有属性，横线填充对应于表格右侧的动态属性。Note: Boxes filled with texture indicate that the attribute or property is used as an index for evaluating corresponding soil function and is included in the soil health assessment index system in this study. Slash fills correspond to the inherent properties on the left side of the table and horizontal fills correspond to the dynamic properties on the right side of the table.

壤肥力，提升作物生产力。有机质具有保肥供肥作用，氮、磷、钾三种营养元素与作物生长息息相关，各类养分及 pH、CEC 这些化学成分和性质会影响土壤环境中发生的众多反应和过程。物理指标可以反映土壤的疏松、紧实程度和透水、通气状况，而生物指标可以反映土壤生物学活性大小，是表征土壤肥力的敏感性指标<sup>[32]</sup>。因此，本文选用了前文提及的所有固有属性以及动态属性。

(2) 持水净水功能。土壤在水循环过程中，需要着重关注其对水分的渗透与吸持能力，土壤持水性能的提高可以增强土壤抗旱能力，保证作物需水要求<sup>[33]</sup>。此外，土壤本身也是污染物质的缓冲带和

过滤器<sup>[34]</sup>，可以通过吸附、分解、转化等过程，降低环境污染给人类和动植物带来的健康风险。质地较黏的土壤水分不易流失，并且可以在一定程度上阻隔污染物的运移。有机质可以改良土壤结构，增强土壤缓冲性能，有机质含量越高，地势越平坦，土壤保水保肥能力就越强<sup>[35]</sup>。土壤吸附重金属和其他污染物质的能力依赖于 pH 的高低<sup>[7]</sup>。此外，水分参数也非常重要，饱和导水率反映了土壤的入渗性质，田间持水量是土壤所能吸持的最大水量，均是表征土壤持水特性的重要因子。所以，本文选取反映土壤持水净水能力的指标主要包括：坡度、坡位、土壤质地、容重、孔隙度、饱和导水率、田间持水

量、有机质、pH 等。

(3) 养分运移与缓冲能力。为作物生长提供养分, 促进土壤生物化学过程与养分循环是土壤的关键功能之一<sup>[36]</sup>, 评价土壤养分运移与缓冲功能主要是探究土壤提供和保蓄营养物质的能力。有机质是土壤养分的主要来源, 土壤微生物参与有机质的分解和养分循环, 能促进土壤养分的有效化, 对养分循环有调控作用<sup>[37]</sup>。土壤温度不仅会影响各种微生物活动, 还影响有机质的分解速率。养分缓冲能力可以通过离子扩散、吸附、交换作用体现<sup>[38]</sup>, 土壤中养分的运移往往伴随着土壤水分的流动, 地下水埋深可以一定程度上影响养分运动速率和缓冲效率。土壤质地影响土壤空气和水热状况, 也影响着养分的转化。土壤团聚体是土壤结构的基本单位, 其大小、稳定性和分布在养分的供应、保持和转化方面发挥着重要的作用<sup>[39]</sup>。所以, 针对该项功能, 本文选取土壤温度、土壤质地、矿物类型、土体厚度、团聚体稳定性、地下水埋深等固有属性以及土壤有机质、CEC、pH、微生物生物量等动态属性。

(4) 碳固存能力。碳固存能力不仅对气候调节有决定性作用, 而且还影响其他土壤功能<sup>[40]</sup>。农田土壤固碳过程受气候、土壤理化性质等自然因素以及农田管理措施等人为因素的影响<sup>[41]</sup>。土壤有机碳储量的多少主要反映在有机质含量上。研究表明, 随着土层深度的增加, 农田土壤有机碳呈下降趋势<sup>[42]</sup>。土壤质地是控制土壤有机碳稳定的重要因素, 黏粒和粉粒存在离子吸附作用, 故与砂质土壤相比, 黏粉质土壤能吸附更多的有机碳<sup>[43]</sup>。土壤容重、pH 与土壤固碳速率密切相关, 这类结构性因素在农田土壤固碳时空变异方面起主导作用<sup>[44]</sup>。此外, 气候条件对有机碳储量也有重要影响, 一般在凉爽潮湿的条件下有机碳储量通常较高, 而在温暖干燥条件下较少<sup>[45]</sup>。相较于其他生态系统土壤碳库, 农田土壤碳库更容易受人类活动的影响, 合理施用有机肥可以增加土壤中的有机质含量, 有助于提高碳固存潜力。所以对该功能进行评价时, 主要考虑年均温、降水量、土壤质地、矿物类型、土体厚度、团聚体稳定性、有机质、容重、pH、蚯蚓丰度等指标。

(5) 栖息地与多样性功能。土壤能够为动植物和微生物及其生命活动提供栖息场所, 这是其他土壤功能的重要前提。栖息地与多样性功能的意义在于提供一个基因库, 防止物种灭绝, 以达到保护稀

有物种和提高生物多样性的作用<sup>[46]</sup>。土壤生物受当地水热条件的影响, 有研究表明, 越靠近赤道, 土壤水热条件越好, 物种丰富度越高, 且随着海拔的升高, 物种多样性呈递减格局<sup>[47]</sup>。容重较大、孔隙度较小的土壤会导致作物长势弱, 出现土壤板结等问题。土壤质地也会影响生物多样性, 砂化程度较高的土壤容易漏水、漏肥, 土质比较贫瘠, 生物量较低, 而有机质含量高、质地肥沃的土壤更利于生物生存。因此, 评价土壤承载生物群落并维持其多样性的能力主要考虑年均温、降水量、海拔、土壤质地、有机质、pH、容重、孔隙度、有效含水量、生物量、微生物多样性等指标。

### 1.5 综合评价方法

本文采用灰色关联分析法, 通过加权关联度来表征各评价对象的固有或动态属性得分值。首先需要确定各指标的权重, 本研究采用熵权法确定各个评价指标的相对重要程度, 即通过计算指标的信息熵值来反映某项指标对于总体评价目标的信息贡献程度<sup>[48]</sup>。

由于各评价指标的量纲和量级存在一定差异, 对土壤健康的贡献效果也不同, 因此, 首先需要进行指标数据的标准化和正向化处理。对于定性指标, 通过文献分析、专家经验法等方式分级确定分值。对于定量指标, 正向数据的处理方法为  $Y = X / \max\{X\}$ , 逆向数据的处理方法为  $Y = \min\{X\} / X$ 。关于表层土壤质地、剖面构型等定性指标, 分级标准参考自然资源部(原国土资源部)提出的《农用地质量分等规程(GB/T 28407-2012)》。对于定量指标, 则通过正向化和标准化的方法转化成 0~1 之间的无量纲值  $S$ 。这样可以保证正向指标(如积温、有机质、CEC 等)和逆向指标(海拔、坡度等)均呈现为当数值越大时, 则说明在某一采样地该项指标表现越优, 对土壤健康的正向贡献也就越大。pH、容重等指标为区间型指标, 但针对黄淮海平原典型农田生态系统, 可将 pH、容重作为逆向数据处理。

假设有  $m$  个待评价对象,  $n$  个评价指标, 则第  $j$  个指标的信息熵值  $h$  及权重值  $\omega$  为<sup>[48]</sup>:

$$h_j = -C \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) (j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中,

$$p_{ij} = S_{ij} / \sum_{i=1}^m S_{ij} \quad (2)$$



$$\omega_j = (1-h_j) / \sum_{j=1}^n (1-h_j) \quad (3)$$

式中,  $C$  为调节系数, 当  $C=1/\ln(m)$  时,  $0 \leq h \leq 1$ 。但在待评价对象较少的情况下, 可能会出现权重差异明显的问题, 与实际情况不符, 为避免这种偶然性, 设调节参数为  $1/mn$ ,  $0 \leq h < 1$ 。

灰色关联分析法是根据每个评价对象指标数列与参考数列对应元素的关联系数大小, 来衡量各评价对象指标数列与参考数列关联程度的一种方法。参考数列一般设定为系统中质量最高的, 所以, 当某评价对象指标数列与其关联度值越大时, 表示与“理想”数列越接近, 说明其质量越优<sup>[49-50]</sup>。灰色关联度的具体计算过程见文献[49]。通过计算灰色关联系数  $\xi_i(j)$ , 再根据熵权法获得的权重即可得到加权关联度值, 作为固有属性 ( $I$ ) 或动态属性 ( $D$ ) 的评分。以某项功能的固有属性得分为例, 计算公式为:

$$I_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \xi_i(j) \quad (4)$$

### 1.6 限制因子乘数

以无风险或功能未受到明显影响的土壤作为基准, 设定其乘数为 1。如果研究区内土壤健康受某些限制因子的影响较大, 则需要考虑其中多种较为严重 (活跃) 的障碍因子对土壤退化的贡献程度, 并确定相应乘数, 然后取限制项指标中的最小乘数作为乘数因子。考虑到不同的限制项指标对于土壤固有属性和动态属性的影响程度存在差异, 比如: 土壤污染等因子以影响动态属性为主, 土壤侵蚀程度等因子对固有和动态属性均有一定影响, 而土壤盐碱化程度、岩石裸露程度等因子对动态属性的影响相对较大, 对固有属性的影响相对较小, 所以本文采用了 2 个乘数, 进而获得各待评价对象不同功能的土壤健康评分和土壤健康综合指数。

$$SH_k = I_k * f_{1k} + D_k * f_{2k} \quad (5)$$

$$SH_c = \sum_{k=1}^5 (W_k \cdot SH_k) \quad (6)$$

式中,  $I$  为固有属性得分,  $D$  为动态属性得分,  $f_1$  和

$f_2$  分别取相应限制因子中的最小乘数,  $W_k$  为第  $k$  项功能的权重。

关于各限制项指标乘数建议值的确定, Mueller 等<sup>[19]</sup>认为乘数的设定需要考虑次一级限制因子的数量。例如, 若干旱是某地区的主要威胁指标, 参考分级手册 (表 3), 将其评级为 1.25 级 (对应乘数为 2.1)。此外, 如果该地区也受到土壤酸化和气候过冷等其他威胁指标的影响, 则需要将乘数降至 1.7。如果想要在更大区域内获得类似的评级结果, 则需要根据可靠的气象数据来进一步估计干旱乘数。

表 3 干旱等级和乘数建议值<sup>[19]</sup>

干旱风险等级 Rating of drought risk	威胁指标的数量 Number of hazard indices			
	0	1	2	3
2 (无 None)	2.94			
1.75 (无-低 None to low)		2.8	2.4	2.1
1.5 (低 Low)		2.6	2.3	2.0
1.25 (低-中 Low to medium)		2.1	1.9	1.7
1 (中 Medium)		1.8	1.6	1.5
0.75 (中-高 Medium to high)		1.5	1.3	1.1
0.5 (高 High)		1.0	0.8	0.6

对于本研究提出的限制项指标, 其风险等级的划分可以参考《农用地质量分等规程 (GB/T 28407-2012)》、《土壤环境监测技术规范 (HJ/T 166-2004)》、《土壤侵蚀分类分级标准 (SL190-2007)》、《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量 (GB 2763-2019)》等标准和规范, 以及相关文献中的分级建议<sup>[51-52]</sup>。由于空间尺度对限制因子乘数分级的设定影响较大, 因此, 本文仅考虑了研究区内的限制项指标对土壤健康状况的影响, 并根据各站点的限制因子对土壤固有属性和动态属性的相对影响程度, 分别设定了 2 个乘数, 侧重 3 个生态实验站土壤健康水平的对比研究与分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 参评指标选取与分析

生态站数据采用封丘、栾城和禹城站中数据

集比较完整的长期采样地 2017 年秋季表层土壤观测数据, 由于部分指标每 5 年才监测一次, 故本文少量数据使用最近年份的数据进行分析。综合考虑评价指标的选取原则, 针对黄淮海平原粮食主产区特点, 依据长期观测及实地调查等数据, 考虑到 3 个典型农田生态系统实验站均位于黄淮海平原农业区, 耕作历史悠久, 土壤固有属性比较接近, 对土壤健康的贡献差异较小, 因此, 最终选用的固有属性包括气候因子中的生长期  $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  积温、年

降水量、气候干燥度、年均温, 地形因子中的海拔高度、坡度, 水文因子中的地下水埋深, 土壤要素中的表土温度、表层土壤质地(黏粒、粉粒、砂粒含量)、砾石含量等; 选用的动态属性包括有机质含量、全氮、全磷、全钾和速效含量、pH、CEC、容重、孔隙度、田间持水量、有效含水量、耕层根生物量、微生物生物量碳、微生物丰度等指标。限于篇幅, 本文仅列出各台站综合观测场土壤评价指标数据, 见表 4。可以看出, 各站地形平坦, 水热

表 4 台站综合观测场指标数据统计

Table 4 Statistics of index data of the comprehensive observation field

指标 Index	生态实验站		
	Ecological experiment station		
	封丘站 Fengqiu	栾城站 Luancheng	禹城站 Yucheng
$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 Accumulated temperature / $^{\circ}\text{C}$	4 484	4 323	4 409
年降水量 Annual precipitation/mm	450.8	445.1	239.7
干燥度 Aridity index	1.5	1.6	1.5
年均温 Annual average temperature/ $^{\circ}\text{C}$	14.9	13.4	14.0
海拔高度 Elevation/m	67.5	50.1	22.0
坡度 Slope/ $^{\circ}$	0.5	0.5	0.2
地下水埋深 Groundwater depth/m	11.7	48.0	2.9
表土温度 Topsoil temperature/ $^{\circ}\text{C}$	16.2	14.1	14.9
表土质地 Soil texture	壤土	粉(砂)壤土	粉壤土
砾石含量 Content of gravels/%	2.0	5.0	4.0
有机质 OM/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	12.95	20.85	18.12
全氮 Total N/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	1.12	1.34	1.09
全磷 Total P/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	1.07	0.97	1.06
全钾 Total K/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	13.2	18.6	17.9
碱解氮 Alkalytic N/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	104.7	104.4	102.6
有效磷 Available P/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	16.1	24.9	16.8
速效钾 Available K/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	125.3	104.7	159.4
pH	8.2	8.3	8.6
CEC/ ( $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	109.5	134.9	128.2
容重 Bulk density/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.4	1.5	1.3
孔隙度 Porosity/%	45.7	43.5	52.8
田间持水量 Water holding capacity/%	38.8	28.9	36.4
有效含水量 Available water capacity/%	33.8	9.4	29.5
耕层根生物量 Tillage root biomass/ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	696.9	602.6	479.0
微生物生物量碳 Microbial biomass C/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	231.8	408.3	279.2
微生物丰度 Microbial abundance/ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 以 C 计 )	84.0	75.0	81.0

条件较好，土壤总体呈弱碱性，其中禹城站 pH 偏高，封丘站较低。有机质含量栾城站较高，封丘站偏低。总体而言，黄淮海平原土壤质地为壤土，土层深厚，无明显侵蚀，保水保肥性能较好。且该地区土壤结构较好，养分整体呈中等水平，比较适宜发展农业。

经过多年耕作，3 个农业生态实验站的土壤已熟化为农业土壤，均无明显侵蚀，地表露头度达到《农用地质量分等规程》中的 I 级标准，无该项风险。关于土壤污染，根据生态环境部《农用地土壤污染风险管控标准（试行）GB 15618-2018》中的污染物风险阈值，计算得到封丘、栾城和禹城的土壤内梅罗综合污染指数均低于 0.7，处于清洁水平，暂无土壤污染风险。根据黄淮海平原典型农田生态系统的实际特点，考虑的限制项指标主要有土壤盐碱化程度、障碍层深度等。禹城站以盐化潮土为主，据第二次土壤普查，该地区春季返盐现象明显，0~5 cm 土层含盐量显著高于下部土层，存在一定程度的盐碱化威胁，近年来经过盐渍土改良，土壤肥力得到明显提高。随着国家土地整治工作的推进，封丘农田土壤含盐量大幅下降，仅个别中低产田会受土壤盐渍化影响。其耕层质地为壤土，下部为壤质黏土，可起到托水托肥的作用。栾城基本不存在盐分积累，土壤质地适中且较为均一，灌排条件较好，90 cm 以内几乎无障碍层次。据此最终设定禹城站  $f_1$  为 0.95， $f_2$  为 0.85；栾城站的乘数为 1；封丘站介于两

者之间，乘数  $f_1$  设为 0.975，乘数  $f_2$  设为 0.95。

## 2.2 土壤健康综合评价

依据所构建的农田土壤健康评价指标体系，按照不同的土壤功能，采用灰色关联分析法，计算固有属性和动态属性中各评价对象与参考数列的综合加权关联度值。然后根据式（5）和式（6）计算得到土壤健康综合指数。考虑到数据的完整性，分别对 3 个站的综合观测场、封丘站 FZ01、FZ02、FZ05、栾城站 FZ01、FZ02、FZ03 和禹城站 FZ01、FZ02 辅助观测场等采样地土壤进行综合评价。表 5 仅列举了各农业生态实验站长期采样地中综合观测场的土壤健康综合评分值。总体来看，3 个站土壤健康平均得分比较接近，但仍存在少量差异。对于土壤生产功能，表现为封丘>禹城>栾城；对于持水净水功能，表现为禹城>栾城>封丘；对于养分运移和缓冲功能，表现为禹城>栾城>封丘；对于碳固存能力，表现为栾城>禹城>封丘；对于栖息地与多样性功能，表现为封丘>栾城>禹城。赋予各功能等权重，则封丘、栾城、禹城站综合观测场的土壤健康综合评分值呈现出禹城>栾城>封丘的结果。根据分值大小的比较结果，整体而言，3 个站点土壤健康状况均较好，其中禹城的总体土壤健康水平相对最优，其次是栾城，再次是封丘。从评价结果看，封丘站土壤健康得分相对偏低，可能是由于封丘县位于黄河北岸，土壤砂粒含量偏高，不利于有机碳的积累和固定，影响了其土壤功能的发挥<sup>[44]</sup>。

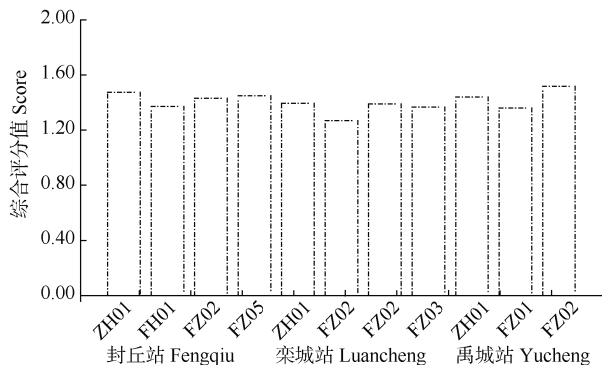
表 5 台站综合观测场土壤健康综合评分值

Table 5 Comprehensive soil health scores of the comprehensive observation field

生态实验站 Ecological experiment station	作物生产 Crop production	持水净水 Water holding & purification	养分运移和缓冲 Nutrient transport & buffering	碳固存 Carbon sequestration	栖息地与多样性 Habitat & diversity	综合值 Comprehensive score
封丘站 Fengqiu	1.48	1.25	1.24	1.37	1.51	1.37
栾城站 Luancheng	1.39	1.38	1.36	1.74	1.41	1.46
禹城站 Yucheng	1.44	1.68	1.46	1.38	1.37	1.47

由于不同采样地的管理措施不尽相同，因而土壤健康存在一定的差异。台站内不同采样地之间的土壤健康差异主要体现在动态属性得分上。图 3 对比了不同农田管理方式下的作物生产功能评分。从图中可以看出，黄淮海平原范围内的 3 个农田生态

系统土壤生产能力总体接近，且整体处于较高水平，但仍呈现出一定差异。各农田生态实验站的 01 号辅助样地（FZ）为对照不施肥区域，故其生产能力均低于其他样地。禹城的 02 号辅助样地施肥处理为过磷酸钙、尿素、小麦秸秆和硫酸钾等，其土壤生产潜



注: ZH: 综合观测场, FZ: 辅助观测场。Note: ZH stands for comprehensive observation field, and FZ for auxiliary observation field.

图 3 不同对照实验下农田土壤生产功能综合评分对比

Fig. 3 Comparison between different experiment fields in comprehensive soil production function score

力明显高于其他样地, 该样地玉米单产同样也是地区最高水平。从各农田生态实验站的综合观测场长期采样地 (ZH) 来看, 封丘站的土壤生产功能最佳。

### 2.3 验证及讨论

本研究针对黄淮海平原典型农田生态系统, 从土壤多功能性的角度构建了一套土壤健康评价指标体系, 并结合对土壤功能有限制作用的乘性因子来体现区域之间的差异。该评价体系参考了德国 Müncheberg 评价系统 (M-SQR), 并且分别考虑了限制因子对固有属性和动态属性影响的差异性, 采用了 2 个乘数, 因而评价方法较为合理。由于生产功能是农田生态系统最基础的功能, 进一步将土壤生产功能评分值与产量进行对比验证。结果显示作物生产功能与产量的  $R^2$  达到 0.60 (图 4), 表明本文所建立的评价指标体系较为合理。

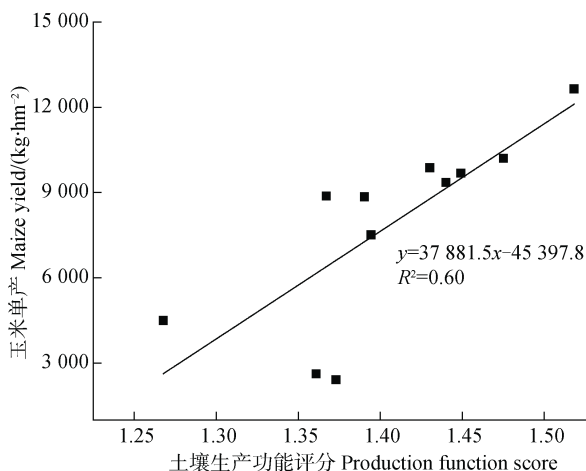


图 4 作物生产功能验证

Fig. 4 Verification of crop production function

德国 M-SQR 指标方案是基于陆生植物需要适合的生长环境和健康的土壤条件建立起来的, 选取与生产力相关的指标进行评分, 并考虑威胁指标的影响, 可以作为全球农田土壤健康评价的实用性参考框架, 已在德国、俄罗斯、中国等国家进行了成功试点<sup>[23, 53]</sup>。有其他学者也基于这种理念, 从基础指标和限制性指标两方面来构建评价体系和方法。Liu 等<sup>[54]</sup>提出了一种评估中国耕地质量的新分级系统, 该评价系统包括生产能力质量 (PCQ) 评价和环境质量 (EQ) 评价两个独立的指标体系和一个综合分等定级方案。其基于 Mueller 等<sup>[19]</sup>的研究理念, 将加权线性模型与最小限制因子法相结合, 应用于耕地产能和环境质量评价, 并以陕西省西部黄土高原地区的义门镇为例, 对新系统进行了实证研究。由此看来, M-SQR 中主要的原则和理念适用于基于不同土壤功能的土壤健康评价, 采用基础项指标和乘性因子相结合的方法是合理的。

本文土壤健康评价的总体框架基础参考的是德国的评价系统, 但具体评价指标的选取方案和综合评价方法与之是不同的。除考虑土壤生产功能外, 还考虑了其他的土壤功能。并且每项功能均有各自对应的基础项指标, 同时也会受到一定程度的限制性因子的影响。其中基础项指标覆盖气象、地形、水文、土壤理化生性质等多方面, 是有针对性地进行选取, 能大体反映出各土壤功能的实际状态和特点。至于具体到特定区域、特定功能, 该乘性因子取值究竟多少才合理, 需要大量样本数据来估算。目前, 针对研究区, 受限于样本量较小, 本研究暂未考虑不同功能之间各乘性因子的差异, 而是将他们同等对待。关于验证部分, 文章对土壤最基础的生产力功能进行了验证, 取得了比较好的拟合效果, 后续可以通过获取更多的样本数据来对其他功能进行进一步验证。

本研究采用熵权系数法确定指标权重, 并根据灰色关联分析法计算评价对象加权关联度值, 进而综合评估土壤健康水平。熵权法虽然是根据原始数据本身所携带的信息计算指标权重, 具有较强的客观性, 但缺乏决策者和专家的经验知识, 有时候得到的权重值可能不一定符合该指标的实际重要程度。今后可以考虑选用多种综合评估方法进行评价, 并对比评估结果, 以找出最佳方案。此外, 由于限制项指标对土壤健康的影响在全国范围内存在较大

差异,所以,本文仅提供了其风险等级的划分参考。根据黄淮海平原典型农田生态系统的实际特点,分别对封丘、栾城和禹城生态站土壤各设定了 2 个乘数,实现站点之间土壤健康的相对比较,存在一定的主观性,若针对其他评价对象和研究尺度,应根据实际情况重新考虑乘数。目前的研究还无法支持对不同的限制项指标在不同尺度、不同地区乘数分级的制定,这个问题将作为后续的研究重点,未来可以依靠大数据技术对乘数进行更加科学的确定。

在土壤健康评价过程中,空间尺度决定了评估成果的适用范围<sup>[25]</sup>。一般而言,空间尺度越小,指标体系的划分就要更加具体细致,才能满足更小区域内评价土壤健康状况的需求。对于不同的评价尺度,评价指标体系总体上是具有相似性的,但为了更好地贯彻因地制宜原则,可以将指标体系考虑得更细致。本文主要针对黄淮海区域典型农田生态系统提出了土壤健康评价方法,不一定适合于其他区域和尺度。实际应用中仍然需要针对区域生态环境及土壤特点,进一步调整或细化指标体系,以更好体现不同尺度的土壤健康分布特征。

### 3 结 论

本研究针对黄淮海平原典型农田生态系统,从土壤的生产功能、持水净水功能、养分运移与缓冲功能、碳固存能力以及栖息地与多样性功能等方面,按照基础项和限制项指标,构建土壤健康评价指标体系。并利用灰色关联分析法,计算得到土壤健康基础分值,然后分别对固有属性和动态属性采用不同的限制因子乘数,综合评估了黄淮海平原 3 个典型农田生态系统土壤健康现状。总体而言,该地区土壤健康水平比较接近,且整体处于较高水平,但仍有所差异,表现为禹城土壤健康水平较高,其次是栾城,再次是封丘。不同农田管理方式下的采样地,其土壤健康也存在一定差异。不施肥的样地,其生产能力均低于该地区其他样地,土壤健康较优的禹城站,其采用施肥+秸秆处理的 02 号辅助样地土壤生产潜力最高。同时,作物生产功能与产量水平  $R^2$  达到 0.60,说明本研究所建立的指标体系较为合理。此评价方法体系可以为相近区域的土壤健康评价提供参考。

**致 谢** 感谢 CERN 农田生态系统实验站封丘站、栾城站、禹城站及土壤分中心、生物分中心、水分分中心、大气分中心和综合中心提供的数据支持。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Warkentin B P. The changing concept of soil quality[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 50 ( 3 ): 226—228.
- [ 2 ] Zhao Q G, Sun B. Soil quality and sustainable environment: I. The definition of soil quality and assessment method[J]. *Soils*, 1997, 29 ( 3 ): 113—120. [赵其国,孙波. 土壤质量与持续环境: I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. *土壤*, 1997, 29 ( 3 ): 113—120.]
- [ 3 ] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality[M]//SSSA. Special publications. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1994: 1—21.
- [ 4 ] European Commission ( EC ). Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and Committee of the Regions “Thematic Strategy for Soil Protection” ( COM( 2006 )231 ). Available online: <http://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52006DC0231>.
- [ 5 ] Glæsner N, Helming K, de Vries W. Do current European policies prevent soil threats and support soil functions?[J]. *Sustainability*, 2014, 6 ( 12 ): 9538—9563.
- [ 6 ] FAO and ITPS, 2015. Status of the World’s Soil Resources( SWSR )—Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- [ 7 ] Liang S Y, Wu K N. Interpretation of evaluation indicators of soil functions[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44 ( 5 ): 1035—1040. [梁思源,吴克宁. 土壤功能评价指标解译[J]. *土壤通报*, 2013, 44 ( 5 ): 1035—1040.]
- [ 8 ] United States Department of Agriculture ( USDA ) -Forest Service: Proposed action for forest plan revision— Nez Perce-Clearwater National Forests[J]. *Soil Quality and Productivity*, 2014.
- [ 9 ] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation ( A guest editorial ) [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61 ( 1 ): 4—10.
- [ 10 ] Warkentin B P, Fletcher H F. Soil quality for intensive agriculture[C]. *Proceedings of the International Seminar on Soil Environment and Fertility Management in Intensive Agriculture*. Tokyo: National Institute of Agricultural Science, 1977, 594—598.
- [ 11 ] Powlson D S. Soil health—useful terminology for communication or meaningless concept? Or both?[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7 ( 3 ): 246—250.

- [ 12 ] Cao Z H, Zhou J M. Soil quality of China[M]. Beijing: Science Press, 2008. [曹志洪, 周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [ 13 ] Natrual Resources Conservation Services: Soil Health. 2012. Retrieved May 20, 2020 from <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/The Soil Renaissance> accepted this definition in 2014.
- [ 14 ] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality – A critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105—125.
- [ 15 ] Moebius-Clune B N, Moebius-Clune D J, Gugino B K, et al. Comprehensive assessment of soil health - the cornell framework. 3.2 edn. Geneva: Cornell University, 2016: 12.
- [ 16 ] Calzolari C, Ungaro F, Filippi N, et al. A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale[J]. *Geoderma*, 2016, 261: 190—203.
- [ 17 ] Rachman L M. Technical development to assess soil health using soil health index in Indonesia[J]. *Journal of Applied and Physical Sciences*, 2018, 4 (3): 79—85.
- [ 18 ] McKenzie D C. Visual soil examination techniques as part of a soil appraisal framework for farm evaluation in Australia[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 127: 26—33.
- [ 19 ] Mueller L, Saparov A, Lischeid G. Novel measurement and assessment tools for monitoring and management of land and water resources in agricultural landscapes of central Asia[M]. Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [ 20 ] Hong S M, Hao J M, Zhou N, et al. Change of cultivated land and its impact on grain production pattern in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (21): 268—277. [洪舒蔓, 郝晋珉, 周宁, 等. 黄淮海平原耕地变化及对粮食生产格局变化的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30 (21): 268—277.]
- [ 21 ] Cheng M Y, Liu Y S, Jiang N. Study on the spatial pattern and mechanism of rural population-land-industry coordinating development in Huang-Huai-Hai Area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(8): 1576—1589. [程明洋, 刘彦随, 蒋宁. 黄淮海地区乡村人-地-业协调发展格局与机制[J]. *地理学报*, 2019, 74 (8): 1576—1589.]
- [ 22 ] Chen Z C, Gong Z T, Zhang G L, et al. Correlation of soil taxa between Chinese soil genetic classification and Chinese soil taxonomy on various scales [J]. *Soils*, 2004, 36 (6): 584—595. [陈志诚, 龚子同, 张甘霖, 等. 不同尺度的中国土壤系统分类参比[J]. *土壤*, 2004, 36 (6): 584—595.]
- [ 23 ] Mueller L, Schindler U, Shepherd T G, et al. A framework for assessing agricultural soil quality on a global scale[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2012, 58 (sup1): S76—S82.
- [ 24 ] Vogel H J, Eberhardt E, Franko U, et al. Quantitative evaluation of soil functions: Potential and state[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, 7: 164. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00164>.
- [ 25 ] Yang Q J, Wu K N, Feng Z, et al. Advancement and revelation of the research on soil quality assessment on large spatial scales[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (3): 565—578. [杨淇钧, 吴克宁, 冯喆, 等. 大空间尺度土壤质量评价研究进展与启示[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (3): 565—578.]
- [ 26 ] Zhang T L, Pan J J. Advancement and direction of soil quality[J]. *Soils*, 1999, 31 (1): 1—7. [张桃林, 潘剑君. 土壤质量研究进展与方向[J]. *土壤*, 1999, 31 (1): 1—7.]
- [ 27 ] United States Department of Agriculture—Natrual Resources Conservation Services: Soil Quality Indicator Sheets. 2015. <http://go.usa.gov/zUAH>.
- [ 28 ] Novák P, Vopravil J, Lagová J. Assessment of the soil quality as a complex of productive and environmental soil function potentials[J]. *Soil and Water Research*, 2010, 5 (3): 113—119.
- [ 29 ] Larson W E, Pierce F J. Conservation and enhancement of soil quality[C]. *Evaluation of sustainable land management in the developing world*. Bangkok, Thailand: International Board of Soil Research Management, 1991.
- [ 30 ] Chen M J, Xiao S Y, Shu Y G. Analysis on soil quality evaluation studies based on CNKI database[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2018, 37(5): 41—48. [陈梦军, 肖盛杨, 舒英格. 基于 CNKI 数据库对土壤质量评价研究现状的分析[J]. *山地农业生物学报*, 2018, 37 (5): 41—48.]
- [ 31 ] Kibblewhite M G. Definition of priority areas for soil protection at a continental scale[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28 (1): 128—133.
- [ 32 ] Ma B, Zhang S D. Review on the microbial indicators of soil quality[J]. *Sichuan Environment*, 2010, 29 (5): 114—118. [马波, 张绍东. 土壤质量微生物学指标研究概述[J]. *四川环境*, 2010, 29 (5): 114—118.]
- [ 33 ] Su Y, Zhu J, Wang P, et al. Research progress on soil water holding capacity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29 (14): 140—145. [苏杨, 朱健, 王平, 等. 土壤持水能力研究进展[J]. *中国农学通报*, 2013, 29 (14): 140—145.]
- [ 34 ] Burauel P, Bassmann F. Soils as filter and buffer for pesticides-Experimental concepts to understand soil functions[J]. *Environmental Pollution (Barking, Essex)*, 2005, 133 (1): 11—16.
- [ 35 ] Liu J H, Li M L, Su J B, et al. Effects of soil organic matter content and terrain slope on soil moisture, crop

- yield[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017(1): 16—18. [刘建华, 李铭亮, 苏剑波, 等. 有机质含量、地形坡度对土壤保水效果及作物产量的影响[J]. *湖南农业科学*, 2017(1): 16—18.]
- [ 36 ] Greiner L, Keller A, Grêt-Regamey A, et al. Soil function assessment: Review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services[J]. *Land Use Policy*, 2017, 69: 224—237.
- [ 37 ] Jiang J, Song M H. Review of the roles of plants and soil microorganisms in regulating ecosystem nutrient cycling[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(8): 979—988. [蒋婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(8): 979—988.]
- [ 38 ] van Rees K C J, Comerford N B, Rao P S C. Defining soil buffer power: Implications for ion diffusion and nutrient uptake modeling[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(5): 1505—1507.
- [ 39 ] Liu Z L, Yu W T, Zhou H, et al. Effects of long-term fertilization on aggregate size distribution and nutrient content[J]. *Soils*, 2011, 43(5): 720—728. [刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(5): 720—728.]
- [ 40 ] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobbey E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales[J]. *Geoderma*, 2019, 333: 149—162.
- [ 41 ] Ding X L, Han X Z, Qiao Y F, et al. Sequestration of organic carbon in cultivated soils: Main factors and their stabilization mechanisms[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 737—744. [丁雪丽, 韩晓增, 乔云发, 等. 农田土壤有机碳固存的主要影响因子及其稳定机制[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 737—744.]
- [ 42 ] Guo Y, Li X L, Wang X J, et al. Profile distribution of soil inorganic and organic carbon in farmland in arid and semi-arid areas of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(6): 1433—1443. [郭洋, 李香兰, 王秀君, 等. 干旱半干旱区农田土壤碳垂直剖面分布特征研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1433—1443.]
- [ 43 ] Wu Q B, Wang X K, Guo R. Soil organic carbon stability and influencing factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(5): 743—747. [吴庆标, 王效科, 郭然. 土壤有机碳稳定性及其影响因素[J]. *土壤通报*, 2005, 36(5): 743—747.]
- [ 44 ] Zhao Z H, Zhang C Z, Liu C H, et al. Spatial variability of soil organic carbon sequestration rate and its influencing factors in Fengqiu County, Henan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1479—1488. [赵占辉, 张丛志, 刘昌华, 等. 河南封丘县域农田土壤固碳速率空间变异特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1479—1488.]
- [ 45 ] Hobbey E, Wilson B, Wilkie A, et al. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia[J]. *Plant and Soil*, 2015, 390(1/2): 111—127.
- [ 46 ] Hooper D U, Chapin III F S, Ewel J J, et al. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge[J]. *Ecological Monographs*, 2005, 75(1): 3—35.
- [ 47 ] Decaëns T. Macroecological patterns in soil communities[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(3): 287—302.
- [ 48 ] Wang Y C, Jing H W, Han L J, et al. Risk analysis on swell-shrink capacity of expansive soils with efficacy coefficient method and entropy coefficient method[J]. *Applied Clay Science*, 2014, 99: 275—281.
- [ 49 ] Tang F F, Deng Y L, Zheng M, et al. Soil quality evaluation in rocky desertification of northwest Hunan Province based on gray correlation analysis[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, 36(9): 36—43. [唐菲菲, 邓艳林, 郑茂, 等. 基于灰色关联分析的湘西北石漠化区土壤质量评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(9): 36—43.]
- [ 50 ] Li Y F, Tang J, Li Y M. Evaluation on grassland soil quality with analysis of principal component and grey relative[J]. *Global Geology*, 2004, 23(2): 169—174, 200. [李月芬, 汤洁, 李艳梅. 用主成分分析和灰色关联度分析评价草原土壤质量[J]. *世界地质*, 2004, 23(2): 169—174, 200.]
- [ 51 ] Wang J X. Soil physical quality degradation characteristics in the Guanzhong farmland[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016. [王加旭. 关中农田土壤物理质量退化特征[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.]
- [ 52 ] Ju X S, Yang X W, Chen L J, et al. Research on determination of station indexes and division of regional flood/drought grades in China[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 8(1): 26—33. [鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟, 等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(1): 26—33.]
- [ 53 ] Li X L, Wu K N, Chu X X, et al. Research progress and prospects for cultivated land productivity evaluation [J]. *China Land Science*, 2019, 33(7): 91—100. [李晓亮, 吴克宁, 褚献献, 等. 耕地产能评价研究进展与展望[J]. *中国土地科学*, 2019, 33(7): 91—100.]
- [ 54 ] Liu L M, Zhou D, Chang X, et al. A new grading system for evaluating China's cultivated land quality[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31(12): 1482—1501.

(责任编辑: 檀满枝)