

DOI: 10.11766/trxb202009280546

吴克宁, 杨淇钧, 赵瑞. 耕地土壤健康及其评价探讨[J]. 土壤学报, 2021, 58 (3): 537-544.

WU Kening, YANG Qijun, ZHAO Rui. A Discussion on Soil Health Assessment of Arable Land in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (3): 537-544.

耕地土壤健康及其评价探讨*

吴克宁^{1, 2†}, 杨淇钧¹, 赵 瑞¹

(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: 开展面向耕地的土壤健康评价, 对保障我国粮食安全和生态文明建设具有紧迫的现实意义。针对相关研究中土壤健康概念抽象、评价尺度杂糅等普遍性问题, 及欧美主流技术路线中的局限性, 文章从概念解构的视角进行了探讨, 提出研究框架, 以期为我国耕地土壤健康评价工作提供参考。首先, 通过构建基于土壤功能与胁迫的土壤健康观, 从理论方面将耕地土壤健康解构为初级生产力、水净化与调节、碳封存与调节、生物多样性供给、养分供给与循环等 5 类土壤功能, 探讨了耕地土壤健康管护理念; 然后, 基于土地评价的一般性原则, 从实践角度对耕地土壤健康进行了尺度划分, 识别了田块、县域、省域和国家等 4 级尺度的耕地土壤健康管护目标。由此, 提出了以表征耕地土壤功能与重金属胁迫为核心的耕地土壤健康评价全流程研究框架。然而, 如何定义并量化耕地(旱地、水浇地和水田)土壤健康状况与土壤功能的供需关系, 科学应用土壤功能评价指标与表征方法, 以实现从土壤功能与胁迫到耕地土壤健康的表达, 仍是重难点, 值得重点关注和进一步研究。

关键词: 耕地; 土壤健康; 土壤功能; 土壤质量; 评价; 尺度

中图分类号: S159; P964 **文献标志码:** A

A Discussion on Soil Health Assessment of Arable Land in China

WU Kening^{1, 2†}, YANG Qijun¹, ZHAO Rui¹

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Nature Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: The soil health status of arable land is related to national food security and ecological security. Current research on soil health assessment faces limitations such as the unclear definition of soil health and confusion of research scales. There are also drawbacks related to mainstream technology routes abroad. Based on literature research and expert interviews, we discussed the above issues from the perspective of conceptual deconstruction and proposed a research framework to provide a reference for the soil health assessment of arable land in China. Firstly, the concept of soil health based on soil functions and threats was constructed. The soil health of arable land was deconstructed theoretically into five types of soil functions: primary productivity, water purification and regulation, carbon sequestration and regulation, provision of functional and intrinsic biodiversity, provision and cycling of nutrients. Also, the idea of management and protection of arable soil health was identified. Secondly, based on the general principles of land evaluation, the soil health of arable land was divided into spatial scales, and four levels of arable soil health management goals, including field, county, province, and country, were proposed. Finally, from the above two aspects, the

* 国家重点研发计划项目(2018YFE0107000)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2018YFE0107000)

作者简介: 吴克宁(1963—), 男, 北京人, 博士, 教授, 主要从事土壤地理和土地评价研究。E-mail: wukening@cugb.edu.cn

收稿日期: 2020-09-28; 收到修改稿日期: 2020-11-15; 网络首发日期(www.cnki.net):

whole process research framework of arable soil health assessment was formed. The research framework can be summarized by the following five points: (1) the scientific connotation and assessment framework of soil health; (2) the relationship between arable soil health with soil functions and threats, and its description; (3) soil functions characterization and soil health assessment of arable land at different scales; (4) spatial differentiation characteristics and influencing factors of arable soil health at different scales; and (5) strategies and models for the management and protection of arable soil health. Nevertheless, this study is faced with the limitations of how to (i) define and quantify the supply-demand relationship between soil health status and soil functions of arable land (dry land, irrigated land, and paddy field), and (ii) scientifically select the indicators and characterization methods of soil functions to realize the expression from soil functions and threats to arable soil health? To answer these questions, more studies are recommended in this area of research.

Key words: Arable land; Soil health; Soil function; Soil quality; Assessment; Scale

土壤是人类赖以生存、兴国安邦、生态文明建设的基础资源。当前,人口压力及与之相关的土地利用变化导致全球土壤资源负担越来越重,土壤退化问题日益突出,粮食安全与农业可持续发展受到极大冲击^[1-3]。近年来,在联合国粮农组织、国际土壤科学联合会等机构的推动下,土壤健康管护理念已成为共识。我国人均耕地较少,土壤质量不高,部分地区土壤退化与污染严重^[4-5],耕地土壤的安全利用面临严重威胁。掌握耕地土壤健康状况及其动态变化,实现耕地土壤健康管护,对保障我国粮食安全和生态文明建设具有紧迫的现实意义^[6-8]。因此,迫切需要开展面向耕地的土壤健康评价^[9-10]。

目前,国内外土壤健康/质量研究主要集中在某个特定土地利用方式下或者农业耕地条件下的中、小空间尺度上^[11],多空间尺度、多功能维度研究相对缺乏^[12]。在实践方面,长期以来,我国自然资源部耕地质量等别调查评价(原农用地分等)和农业农村部耕地质量等级调查评价(原耕地地力调查评价)两项工作中,形成了以县域为项目单位、以田块为评价单元,逐级汇总形成省域、国家级成果的耕地资源评价体系,为耕地利用与管理提供了坚实的基础。但这两套方案受当时科学方法和保护理念制约,一方面,忽略了土地评价中“不同尺度解决不同问题”的一般性原则,存在尺度杂糅的问题,不易准确、快速地描绘县域以上尺度的状况,难以满足不同层级的管理需求。另一方面,两套方案主要表征“本底”生产潜力、服务耕地培肥,对土壤功能与土壤环境状况考虑不足,评价结果作用单一,难以服务目前多目标的耕地土壤健康管护。在理论研究缺位和实践方案存在缺陷的背景下,建立耕地土壤健康的多尺度评价理论与方法,已成为我国耕

地资源管理领域亟待突破的瓶颈。本文针对土壤健康概念抽象、评价尺度杂糅等相关研究中的普遍性问题,和欧美主流技术路线中的局限性,从概念解构的视角进行探讨,并提出研究框架,以期为耕地土壤健康评价工作提供启示。

1 土壤健康概念及其解构

1.1 土壤健康的经典定义

土壤健康是在土壤质量研究不断发展中衍生的概念。土壤质量研究始于20世纪70年代^[13],随着多年的发展形成了相对稳定的概念定义:土壤质量,即土壤在生态系统和土地利用范围内,维持生物的生产力、维护环境质量、促进动植物和人类健康的能力^[14-16]。早期研究中,“土壤健康”常用作“土壤质量”的同义词^[17]。近年来,土壤健康概念得到进一步完善:土壤是一个支撑植物、动物和人类生存的重要生态系统,土壤健康即为其持续发挥这种功能的能力^[18]。我国已将土壤健康状况概念性地引入《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016),界定为土壤作为一个动态生命系统具有的维持其功能的持续能力。

当前,仍有学者认为土壤健康和土壤质量两者相对等同,可互换使用^[19]。另一种观点认为土壤质量包含固有(inherent)和动态(dynamic)质量,固有土壤质量是指与土壤天然成分和性状(即土壤类型)相关的土壤质量,长期受自然因素和成土过程影响大^[20];动态土壤质量才相当于土壤健康,是指由于土壤使用和管理而在人类时间尺度上发生变化的土壤性状,例如有机质、容重和团聚体稳定性等^[18]。

从上述概念梳理来看,土壤健康已经形成了较为一致的经典定义,抽象地概括了健康的土壤应具备的

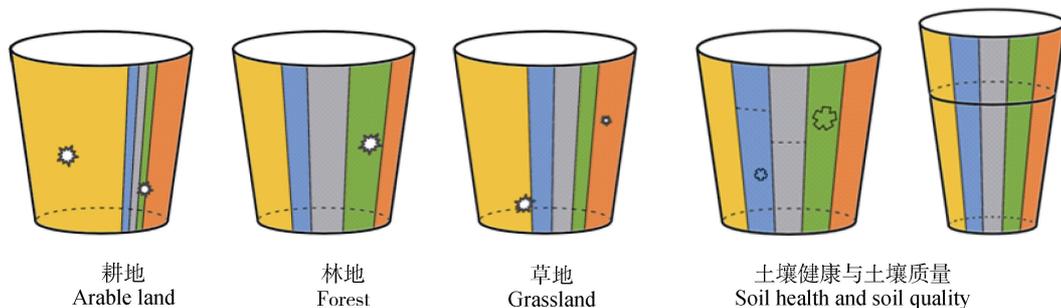
特性。但如同土壤质量概念一样，由于土壤健康与土地关系的密切相关性，时至今日它仍因受人为主观影响而被质疑其科学属性。这种争议性和它本身的抽象性，给土壤健康评价工作带来了一定困扰。

1.2 基于土壤功能与胁迫的土壤健康观

土壤健康状况又可概括为发挥土壤功能和提供土壤生态系统服务的能力^[21]。土壤功能是支撑提供生态系统服务的一系列土壤过程^[22]，土壤胁迫是影响这一系列过程的重要因素^[23]。土壤功能、土壤生态系统服务与土壤胁迫共同构成了近年来土壤健康/质量评价研究的主要内容^[24-27]。目前，国内外土壤功能分类方案不尽相同^[28]，但土壤健康研究中关注的主要土壤功能基本一致，即与农林生产密切相关的：初级生产力、水净化与调节、碳封存与调节、生物多样性供给、养分供给与循环等功能^[29-30]。

从土壤健康的经典定义中的“功能”入手，引入土壤功能（土壤生态系统服务）理论，将抽象的土壤健康解构为多种易被客观描述的、与农林生产相关的土壤功能，再结合具体农地类型对土壤功能的需求，探讨土壤功能供给能力和土壤胁迫程度，由此评价土壤健康状况。土壤功能对于土壤健康评

价，可类比为人体机能对于人体健康状况评估，它是土壤健康的重要组成，将后者概念具体化。这里借用木桶理论，进一步阐述土壤健康、土壤功能与胁迫的逻辑关系，辨析土壤健康与土壤质量的区别。如图 1a 所示，耕地、林地和草地等农地类型分别对应不同木桶，初级生产力、水净化与调节、碳封存与调节、生物多样性供给、养分供给与循环等土壤功能即为组成各个木桶的木板，依据功能性土地管理理论^[29, 31]，不同农地类型对各种土壤功能的需求存在差异，即组成不同木桶的木板的配比不同，基于此“木桶结构”，考虑是否存在短板、漏洞或结构问题，以判断各个农地类型的土壤健康状况。关于土壤健康与土壤质量，从两者的经典定义来看，它们存在相互转换、各有侧重的关系，但从土壤质量到土壤健康，实质是土壤资源管护理念的进步。如图 1b 所示，土壤质量可以类比为木桶容积，土壤健康则可看作木桶发挥正常作用的状态，土壤天生禀赋有差异，对土壤资源的管护应该是补短板与漏洞——改善健康状态，提下限——保育以不退化，而非一味加高木桶——机械集约拔高“耕地质量”，形成土壤生态系统结构失调、欠稳定的不可持续状态。



土壤功能 Soil functions: ■初级生产力 Primary productivity, ■水净化与调节 Water purification and regulation, ■碳封存与调节 Carbon sequestration and regulation, ■生物多样性供给 Provision of functional and intrinsic biodiversity, ■养分供给与循环 Provision and cycling of nutrients

土壤胁迫 Soil threats: ☀污染、侵蚀、有机质减少、盐碱化、压实等 Pollution, Erosion, SOM decline, Salinization, Compaction, etc.

图 1 基于土壤功能与胁迫的土壤健康观的概念图示

Fig. 1 The conceptual illustration of the concept of soil health based on soil functions and threats

这种基于土壤功能与胁迫的土壤健康观，既可以客观描述土壤的多种功能，又可以依据农地利用与土壤管护需求，有针对地评价土壤健康状况，兼具客观科学性和主观实践性。

1.3 土壤健康的尺度问题

土壤健康的尺度问题是指，在土壤健康评价中，

不同空间尺度、评价对象所偏重的评判标准不同，不同尺度下评价方法和作用有显著差异。这也可以概括为土地评价的一般性原则——不同尺度解决不同问题。所以，尺度问题是解构土壤健康的另一重要视角，它从实践方面区分了土壤健康评价的方法与作用。

对国际上涉及空间尺度的土壤健康/质量研究成果进行分类统计,可知研究尺度聚焦于国家/地区、流域/集水区、景观/农场、田块等类别^[21]。而在我国耕地资源管理体系中,田块是基层评价单元,是农户进行生产活动的最大均一单位;县域是常用项目单位,也是耕地资源可持续利用与管理的常用尺度;而省域和国家等宏观尺度,尚缺乏直接的评价方案。所以,结合我国耕地资源管理的实际情况与需求,面向耕地的土壤健康评价研究宜主要关注田块、县域、省域和国家等4级尺度。

2 耕地土壤健康评价研究思路

自21世纪初以来,由美国农业部科学家Andrews等^[32]提出的土壤管理评价框架(Soil Management Assessment Framework, SMAF),在全球得到了广泛应用,并被不断改良与发展^[19],对土壤健康/质量研究产生了深远影响。在这一理论框架指引下,土壤健康评价形成了“制定评价目标—明确评价对象和涉及的土壤功能—选取评价指标与评价方式—输出评价结果”的一般技术路线。目前,土壤健康评价主要有以下两类实践方案:以美国康奈尔土壤健康综合评价^[18]和印度土壤健康卡^[33]为代表的田块尺度土壤健康评价方案已经过数次迭代,并开展了初步实践,它们的特征是中间过程不评价具体的土壤功能,而以指标直接评价土壤健康状况;以土壤功能研究见长的欧盟研究团队,则提出将各类土壤功能评价结果分土地利用类型进行整合,指导功能性土地管理,以实现土壤健康管护。两者均已形成了自洽的理论体系,各有特色,但是也分别存在一定局限性:前者对土壤健康的解析较为模糊,现有方案难以实现大中尺度的空间制图;后者对不同土地利用方式的土壤功能需求分异的探讨,仍停留在概念层面,基于土壤功能的土壤健康状况表达的具体方法有待研究。

针对两种主流土壤健康评价技术路线,不同尺度的耕地土壤健康概念解析、指标映射和结果表达等技术瓶颈,基于前述的两种土壤健康解构思路,可构建如下全流程研究框架,主要包含5部分研究内容:

(1) 土壤健康的科学内涵与评价框架。初步界定“耕地土壤健康”的内涵为:基于耕地(旱地、水浇地和水田)自身特性与利用需求,持续供给初级

生产力、水净化与调节、碳封存与调节、生物多样性供给、养分供给与循环等5类土壤功能,且不存在显著土壤胁迫的状态。结合功能性土地管理理论,拟定“土壤功能/胁迫—耕地土壤健康”整合评价路径,构建适用于多尺度的普适性耕地土壤健康评价理论框架。

(2) 耕地土壤健康与土壤功能供需、土壤胁迫的关系及其表达。结合土壤健康内涵与耕地利用导向,明确5类土壤功能的供需与耕地土壤健康状况之间的关系。土壤污染是耕地安全利用的关键影响因素,侵蚀、有机质减少、盐碱化、压实等其他土壤胁迫类型均可以通过土壤功能评价中的具体指标体现,宜选取重金属污染为典型胁迫因素,探讨基于土壤功能表征结果和重金属胁迫风险管控的耕地土壤健康分级方案。

(3) 不同尺度耕地土壤功能表征与土壤健康评价。在土壤健康评价框架内,根据研究区实际情况和数据条件选择评价模型与指标,准确表征各土壤功能,将土壤功能表征结果和重金属污染水平导入拟定的耕地土壤健康分级方案,实现综合评价。不同空间尺度的土壤功能表征存在显著差异,国家尺度:基于广域地学栅格数据和解译土壤系统分类(高级单元)成果,以农业区划方案划分研究区单元,进行粗分辨率土壤功能空间制图;省域尺度:集成遥感、土壤地球化学调查、土壤普查和国土调查等数据,对省域耕地进行土壤功能空间制图;县域尺度:通过整合土地利用现状、耕地质量分等数据库和空间插值布点采样测试结果,对县域耕地进行多时序的图斑精度土壤功能空间制图;田块尺度:在县域尺度研究区内布点采集选取不同土壤类型的土壤样本,通过对土壤物理、化学、生物性状的测试结果和农田管理利用因素的统计分析,构建隶属度函数,定量描述不同土壤类型田块及其土壤功能分异及动态变化。

(4) 不同尺度耕地土壤健康空间分异特征及影响要素。基于不同尺度耕地土壤健康评价结果空间特征,及相关驱动因子的相关关系,揭示耕地土壤健康空间分异规律。分析不同尺度土壤功能表征结果与其他自然资源要素、土地利用、农地管理、社会经济等数据的空间相关性,识别耕地土壤健康状况空间分异的影响因子,比较各因子在不同尺度上的作用强弱以明确其尺度特征,以此探明关键影响

要素及其作用机理。

(5) 耕地土壤健康管护的对策和模式。模拟耕地土壤健康与影响要素之间的响应关系机制, 预测不同气候变化和农田管理情境下, 研究区的耕地土壤健康状况演变, 识别风险并提出耕地资源优化管护措施。例如: 国家、省域尺度, 基于耕地土壤健康状况的空间和程度变化, 刻画耕地土壤健康短板区和脆弱区, 研究对应的优化和保育策略; 县域尺度, 探讨不同种植制度条件、集约度水平下, 县域耕地土壤健康总体状况和空间变异, 基于此提出典型区县域耕地土壤健康管护策略; 田块尺度, 结合不同耕地管理情境, 识别土壤健康限制因素, 建立维护耕地土壤健康的农田管理模式。

通过依次开展 5 部分研究, 以期实现 3 方面目标: 第一, 构建基于土壤功能与胁迫的土壤健康概念模型, 和适用于国家、省域、县域、田块尺度的耕地土壤健康评价框架; 第二, 进行多尺度案例研究, 实践服务于我国多层次耕地资源管理的耕地土壤健康评价理论与方法; 第三, 明确耕地土壤健康状况空间分异规律及其尺度特征, 揭示不同空间尺度下耕地土壤健康状况对农田管理和气候变化等的响应机制, 提出优化管护策略。

3 存在的主要问题

3.1 从土壤功能与胁迫到耕地土壤健康

本文提出将土壤健康解构为土壤功能与胁迫, 借由表征土壤功能与重金属胁迫来评价耕地土壤健康状况。这一过程需引入功能性土地管理理论^[29, 31], 即耕地、林地和草地等不同农地利用类型对各类土壤功能的需求存在差异, 这一理论初步阐述了土壤功能与土壤健康/质量的关系, 为耕地土壤健康评价结果整合提供了新思路: 评价土壤健康, 应视耕地利用对土壤功能的需求而定, 即关注与耕地利用相关的土壤功能供给能力。本文提出基于先验知识, 构建半定量化的土壤功能供需判别矩阵, 再叠加土壤重金属污染胁迫水平, 形成耕地土壤健康评价矩阵, 将耕地土壤分为健康、亚健康和不健康等 3 个等级的初步路径。

3.2 土壤功能表征指标的选取

指标选取是各类土壤资源评价工作的重中之重, 它决定了评价的科学性与效率。相关研究在选

取指标时, 主要依据土壤学基础理论和专家经验等先验知识, 所以常因较大的主观性而被诟病。随着国内外土壤质量研究的发展, 一方面, 与土壤健康、土壤功能与胁迫的同行评议成果日趋丰富, 对这些成果进行广泛的分类统计分析, 可以基于指标使用频率反映学界共识, 以提高指标客观性。另一方面, 近年来我国陆续出台了《农用地质量分等规程》(GB/T 28407—2012)、《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016) 等国家标准, 这些成果可视为一种“类专家系统”, 也可为相关研究的指标选取、分级和区域划分提供支撑^[34]。

数据条件是选取指标的主要制约因素, 但从尺度分异视角来看, 数据可得性与指标选取具有逻辑上的一致性。例如, 大空间尺度主要关注土壤功能内生潜力与演进趋势, 宜采用能反映土壤固有属性的静态指标, 这些指标与广域空间数字土壤制图成果相对一致; 而小空间尺度主要关注土壤功能发挥情况与当前状态, 需采用能响应农田管理措施的动态指标, 这些指标则可通过采样测试获取^[35-36], 见图 2。

3.3 主观评价与客观模拟

评价 (assessment) 与建模 (modeling) 是资源环境研究中两种主要研究思路, 评价是应用导向下对研究对象进行主观描述, 主要依据文献、专家经验等先验知识构建指标体系和评分函数, 评价过程实质形成了支持决策的模糊系统, 技术路线简单易行, 评价结果具有较好的实用性; 建模是理论研究中研究对象进行客观表征, 主要通过识别事物运行机理与过程, 对其实际情况进行模拟, 模拟质量有赖于建模水平, 表征结果相对客观。两种研究思路各有所长, 在耕地土壤健康评价中应综合使用。例如, 在不同尺度土壤功能表征中, 由于广域空间地学数据类型有限、数据体量巨大、气候与地体条件复杂, 大空间尺度研究在分析数据、构建专家系统等主观评价过程存在局限, 而通过机器学习算法挖掘指标与土壤功能之间的映射关系, 进行土壤功能客观模拟与制图, 更具可行性; 中小尺度研究, 则宜充分考虑研究区具体情况, 采用主观评价与客观模拟相结合的方式。又如, 从土壤功能与胁迫到耕地土壤健康的评价思路中, 土壤功能与胁迫是客观存在的, 可进行建模与模拟研究, 而耕地土壤健康概念与人地关系密切相关, 具有明显的主观性, 所以在构建基于土壤功能与胁迫的耕地土壤健康评

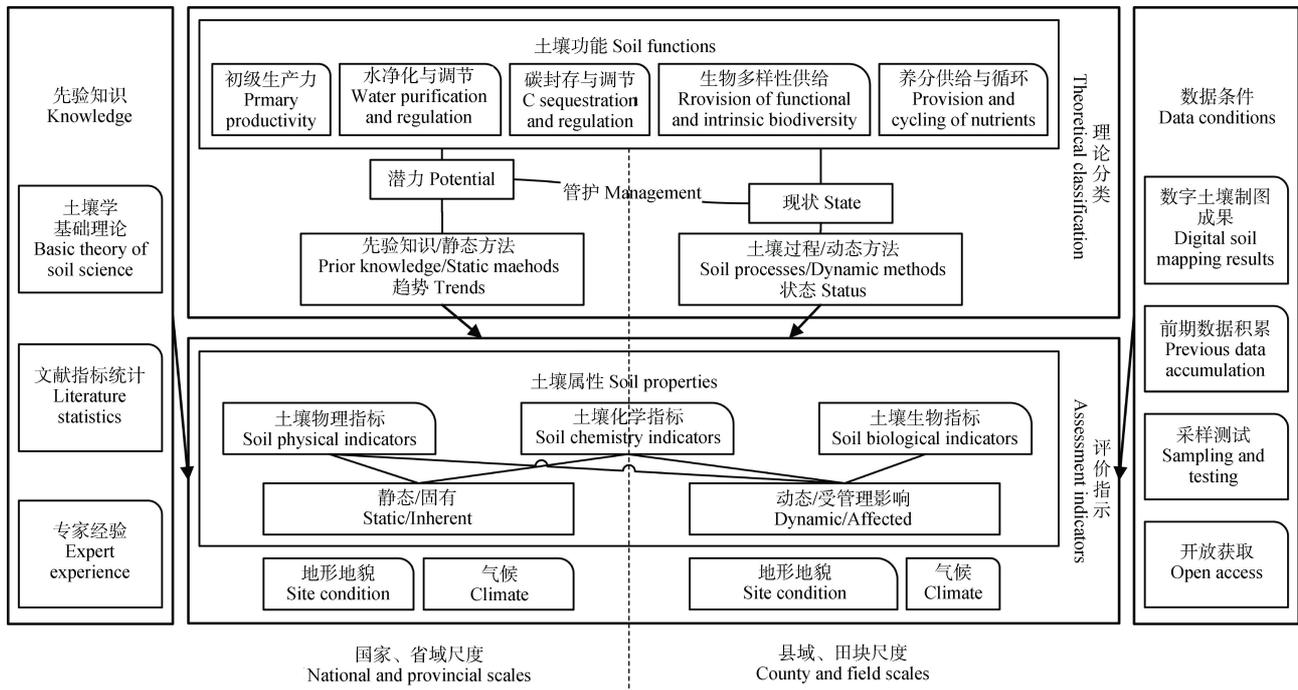


图 2 筛选土壤功能表征指标思路
Fig. 2 Ideas for screening indicators that characterize soil functions

价矩阵时，需采用主观评价的思路。这种“客观模拟—主观评价”两步走的耕地土壤健康评价路线，能提高评价结果的客观性，且兼顾其实践意义。

4 结 语

土壤健康的具体含义和关注的土壤功能会因研究区及其空间尺度不同而有所差异。通过构建基于土壤功能与胁迫的土壤健康观，从理论方面将耕地土壤健康解构为初级生产力、水净化与调节、碳封存与调节、生物多样性供给、养分供给与循环等 5 类土壤功能，探讨了耕地土壤健康管护理念。基于土地评价的一般性原则，从实践角度对耕地土壤健康进行了尺度划分，提出了田块、县域、省域和国家等 4 级尺度的耕地土壤健康管护目标。由此，形成了以土壤功能分解与表达为核心，以空间尺度为划分的耕地土壤健康评价全流程研究框架。在此框架内，如何定义并量化耕地（旱地、水浇地和水田）土壤健康状况与土壤功能的供需关系，科学选取土壤功能评价指标与表征方法，以实现从土壤功能与胁迫到耕地土壤健康的表达，仍是重难点，值得重点关注和进一步研究。

参考文献 (References)

[1] Peng X Z. China's demographic history and future challenges[J]. Science, 2011, 333 (6042): 581—587.

[2] Yang H, Huang X, Thompson J R, et al. Soil pollution: Urban brownfields[J]. Science, 2014, 344 (6185): 691—692.

[3] Zhao Q G, He J Z, Yan X Y, et al. Progress in significant soil science fields of China over the last three decades: A review[J]. Pedosphere, 2011, 21 (1): 1—10.

[4] Shen R F, Wang C, Sun B. Soil related scientific and technological problems in implementing strategy of “Storing Grain in Land and Technology”[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (2): 135—144. [沈仁芳, 王超, 孙波. “藏粮于地、藏粮于技”战略实施中的土壤科学与技术问题[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 135—144.]

[5] Xu M G, Lu C A, Zhang W J, et al. Situation of the quality of arable land in China and improvement strategy[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37 (7): 8—14. [徐明岗, 卢昌艾, 张文菊, 等. 我国耕地质量状况与提升对策[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37 (7): 8—14.]

[6] Zhang J L, Zhang J Z, Shen J B, et al. Soil health and agriculture green development: Opportunities and challenges[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (4): 783—796. [张俊伶, 张江周, 申建波, 等. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策[J]. 土壤学报, 2020, 57 (4): 783—796.]

- [7] Zhou J M. Evolution of soil quality and sustainable use of soil resources in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30 (4): 459—467. [周健民. 浅谈我国土壤质量变化与耕地资源可持续利用[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30 (4): 459—467.]
- [8] Tang H Z, Sang L L, Yun W J. China's cultivated land balance policy implementation dilemma and direction of scientific and technological innovation[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35 (5): 637—644. [汤怀志, 桑玲玲, 郇文聚. 我国耕地占补平衡政策实施困境及科技创新方向[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35 (5): 637—644.]
- [9] Karlen D L, Veum K S, Sudduth K A, et al. Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104365.
- [10] Rinot O, Levy G J, Steinberger Y, et al. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 1484—1491.
- [11] Lin F F. Spatial variation mechanism, evaluation and application of soil quality at different scales[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. [林芬芳. 不同尺度土壤质量空间变异机理、评价及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.]
- [12] Grunwald S, Thompson J A, Boettinger J L. Digital soil mapping and modeling at continental scales: Finding solutions for global issues[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75 (4): 1201—1213.
- [13] Mausel P W. Soil quality in illinois - An example of a soils geography resource analysis[J]. *The Professional Geographer*, 1971, 23 (2): 127—136.
- [14] Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment[M]. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1994.
- [15] 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.
- [16] 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.]
- [17] Acton D F, Gregorich L J, Canada, et al. The health of our soils: Toward sustainable agriculture in Canada [M]. [Ottawa] : Agriculture and Agri-Food Canada, 1995.
- [18] Moebius-Clune B N, Moebius-Clune D J, Gugino B K, et al. Comprehensive assessment of soil health - the cornell framework[M]. 3.2 edn. Geneva, NY: Cornell University, 2016.
- [19] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality-A critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105—125.
- [20] Zhang T L, Pan J J, Zhao Q G. Progress and direction of soil quality research[J]. *Soils*, 1999, 31 (1): 1—7. [张桃林, 潘剑君, 赵其国. 土壤质量研究进展与方向[J]. *土壤*, 1999, 31 (1): 1—7.]
- [21] Yang Q J, Wu K N, Feng Z, et al. Soil quality assessment on large spatial scales: Advancement and revelation[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.]
- [22] Glenk K, McVittie A, Moran D. Deliverable d3.1: Soil and soil organic carbon within an ecosystem service approach linking biophysical and economic data[J/OL]. 2012-10-08[2020-07-20]. http://smartsoil.eu/fileadmin/www.smartsoil.eu/WP3/D3_1_Final.pdf.
- [23] Kibblewhite M G, Ritz K, Swift M J. Soil health in agricultural systems[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 685—701.
- [24] Baveye P C, Baveye J, Gowdy J. Soil “ecosystem” services and natural capital: Critical appraisal of research on uncertain ground[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2016, 4: 41. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00041>.
- [25] Bouma J. Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: Linking soil functions with ecosystem services[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177 (2): 111—120.
- [26] Sojka R E, Upchurch D R. Reservations regarding the soil quality concept[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63 (5): 1039—1054.
- [27] Volchko Y, Norrman J, Bergknut M, et al. Incorporating the soil function concept into sustainability appraisal of remediation alternatives[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 367—376.
- [28] Wu K N, Liang S Y, Ju B, et al. Research review on classification and evaluation of soil functions[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (4): 980—985. [吴克宁, 梁思源, 鞠兵, 等. 土壤功能及其分类与评价研究进展[J]. *土壤通报*, 2011, 42 (4): 980—985.]
- [29] Schulte R P O, Creamer R E, Donnellan T, et al. Functional land management: A framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture[J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, 38: 45—58.
- [30] Helming K, Daedlow K, Paul C, et al. Managing soil functions for a sustainable bioeconomy-Assessment framework and state of the art[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29 (9): 3112—3126.
- [31] Coyle C, Creamer R E, Schulte R P O, et al. A functional land management conceptual framework under soil drainage and land use scenarios[J]. *Environmental Science & Policy*, 2016, 56: 39—48.

- [32] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (6): 1945—1962.
- [33] Purakayastha T J, Pathak H, Kumari S, et al. Soil health card development for efficient soil management in Haryana, India[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191: 294—305.
- [34] Wu K N, Yang Q J, Chen J Y, et al. Soil quality and functions: From science to experiences—A review of the wageningen soil conference 2019[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51 (1): 241—244. [吴克宁, 杨淇钧, 陈家赢, 等. 土壤质量与功能: 从科学到实践——2019 年荷兰瓦赫宁根土壤会议综述[J]. *土壤通报*, 2020, 51 (1): 241—244.]
- [35] 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.
- [36] 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>.

(责任编辑: 檀满枝)