doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.035

基于土壤功能与胁迫的耕地土壤健康评价方法

赵　瑞[1]　吴克宁[1,2]　杨淇钧[1]　冯　喆[1]　赵华甫[1]　张　琢[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: 基于功能性土壤管理理论,针对初级生产力、养分供给与循环、生物多样性供给、水净化与调节、碳封存与调节 5 种功能选取评价指标,通过识别水田、水浇地和旱地对不同土壤功能的供给和需求关系,构建土壤功能供需判别矩阵,并叠加重金属污染胁迫因素,评价耕地土壤的健康状况,从而实现了基于土壤功能与胁迫的耕地土壤健康评价。在河南省温县进行了评价方法的适用性研究,结果表明:温县 5 种土壤功能供需空间格局基本呈现由南向北逐渐递增的趋势,以青峰岭为界,中北部土壤功能的供需处于盈余状态,而南部区域处于失衡状态;土壤健康等级交错分布,亚健康面积占比最大,为 44.4%,健康土壤零散分布在黄庄镇、番田镇、武德镇和祥云镇;土壤质地、土体构型、土壤养分、土壤生物活性和重金属污染胁迫是导致耕地土壤健康空间分异的主要因素。本研究可在理论上丰富土壤健康评价方法体系,在实践上促进耕地资源可持续利用与管理。

关键词: 土壤健康; 土壤功能; 土壤胁迫; 供需判别; 评价矩阵

中图分类号: F301.21　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0333-11　　**OSID**:

Farmland Soil Health Evaluation Method Based on Soil Function and Soil Threat

ZHAO Rui[1]　WU Kening[1,2]　YANG Qijun[1]　FENG Zhe[1]　ZHAO Huafu[1]　ZHANG Zhuo[1]

(1. *School of Land Science and Technology*, *China University of Geoscience* (*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100035, *China*)

Abstract: Farmland soil is the foundation of national food security, and the management and protection of soil health is crucial to achieve sustainable development goals. Based on the theory of functional soil management, selected evaluation indicators for the five functions of primary productivity, provision and cycling of nutrients, provision of functional and intrinsic biodiversity, water purification and regulation, and carbon sequestration and regulation, by identifying paddy land, irrigated land and dry land for different soils. The relationship between the supply and demand of functions was identified, a soil function supply and demand discriminant matrix was constructed, and the heavy metal pollution threat factors were overlied, the farmland soil health was evaluated, and the spatial mapping of evaluation indicator—soil function/threat—soil health was realized. A study on the applicability of the evaluation method was carried out in Wen County, Henan Province. The results showed that the spatial pattern of the supply and demand of the five soil functions in Wen County basically showed a trend of gradually increasing from south to north, with Qingfengling as the boundary, the supply and demand of soil functions in the central and northern regions were in surplus, while the supply and demand in the southern region were in an imbalanced state. Staggered distribution of soil health grades, the sub-health area accounted for the largest proportion, accounting for 44.4%. Healthy soil was scattered in Huangzhuang Town, Fantian Town, Wude Town, and Xiangyun Town. Soil texture, soil structure, soil nutrients, soil biological activity and heavy metal pollution threat were the main factors for the spatial differentiation of soil health. This research can enrich the soil health evaluation method system theoretically, and promote the sustainable utilization and management of farmland resources in practice.

Key words: soil health; soil function; soil threat; supply and demand judgment; evaluation matrix

收稿日期: 2021-02-01　修回日期: 2021-04-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFE0107000)

作者简介: 赵瑞(1993—),女,博士生,主要从事土壤健康和土地评价研究,E-mail: zhaoruifighting@cugb.edu.cn

通信作者: 吴克宁(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤地理和土地评价研究,E-mail: wukening@cugb.edu.cn

0 引言

耕地是保障国家粮食安全的基础,土壤是耕地生产的重要载体,是维持耕地可持续利用至关重要的有限资源。现有的耕地土壤健康(质量)评价研究大多关注生产能力,而对土壤功能与生态环境效应考虑不足,这不利于科学评价和管理[1]。土壤健康研究可在土壤管理中增加生物学观点,以应对粮食生产的可持续性挑战[2]。土壤健康状况直接影响着人类的生产、生活和生态安全,研究耕地土壤健康状况及其空间分布特征,对实现耕地资源管护,保障粮食安全和生态文明建设具有紧迫的现实意义[3-4]。近年来,一些国家和国际组织相继提出了有关土壤健康的行动计划,如世界粮农组织的全球土壤伙伴计划(Global soil partnership,GSP)、美国农业部的土壤健康——解开土壤奥秘行动计划、欧盟土壤健康行动计划等,中国土壤学会于 2018 年成立土壤健康工作组,开始关注健康土壤的培育思路及行动路径[5]。

在早期研究中,“土壤健康”常用作“土壤质量”的同义词。土壤质量评估通常侧重于作物生产,但实质上,土壤健康涵盖土壤在水质、气候变化和人类健康方面的综合影响作用[6-8]。1941 年 LEOPOLD[9] 首次提出“土壤健康”是土壤具有的自我调节与更新的能力。随着研究的不断深入,土壤健康概念进一步完善,使用较多的是美国农业部定义的“土壤作为重要的生态系统,可维持动植物和人类生命的持续能力”[10]。我国于 2016 年将土壤健康概念引入 GB/T 33469—2016《耕地质量等级》,土壤作为一个动态生命系统具有维持其功能的持续能力。也有学者陆续进行了土地健康[11]、土壤健康[12]、耕地健康[13]、耕地健康产能[14]等研究,丰富了土壤健康的内涵。在 ANDREWS 等[15]提出的土壤管理评价框架(Soil management assessment framework, SMAF)下,土壤健康评价方法已形成了“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”的常用技术路线。土壤具有多种功能,在农业生产和维持陆地生态系统稳定等方面发挥着重要作用。通过选取土壤属性、地形地貌和气候条件等指标,利用定性定量模型和数字土壤制图技术准确表征各种土壤功能,然后对多种土壤功能的评价结果进行整合和分析,这是土壤健康评价的基础[16]。

目前,已有如康奈尔土壤健康综合评价(Comprehensive assessment of soil health-the Cornell framework, CASH)系统[17]、印度土壤健康卡(Soil health card, SHC)[18]和欧洲土壤监测和评估框架[19]等土壤健康评价方案,但均未明确目标土壤功能,只能满足特定空间尺度的土壤利用与管理需求[20]。此外,健康的土壤具有恢复力和抵抗力,能够在没有环境污染胁迫的情况下实现高生产力[21]。德国同时关注土壤功能和重金属污染胁迫,进行了服务于自然资源管理实际需求的土壤功能评价研究[22]。欧盟土壤专题战略确定了对欧洲土壤质量的主要威胁是土壤侵蚀、有机质减少、污染、密封、压实、土壤生物多样性减少、盐渍化、洪水和滑坡[23]。欧洲环境局提出的 DPSIR(Driver-pressure-state-impact-response)框架将整个土壤生态系统服务过程和土壤胁迫联系在一起,评价和管理土壤生态系统服务功能[24],并用来支持和管理土壤资源的相关决策。DPSIR 框架强调了土地利用管理和土壤胁迫,指出了土壤功能发挥可能受到的阻碍[25]。现有将土壤生态系统服务与土壤功能结合的研究中鲜有考虑土壤胁迫作用[26]。目前,国内外土壤功能分类方案不尽相同[27],但土壤健康研究中关注的主要土壤功能多与农林生产密切相关,如初级生产力、养分供给与循环等功能[28]。近年来,土壤健康评估方法研究[29-34]的核心思想都是通过汇集丰富多元的信息开展定性、定量评估,以便系统、直观地表征土壤健康状况。

土壤具有多相性和多功能性,衡量土壤健康(质量)状况不可能使用单一指标和方法,也无法一直通用一个标准[35]。基于此,本文总结并融合德国 M-SQR 评估方案和美国康奈尔土壤健康评估指标,整合“评价指标—土壤功能/胁迫—土壤健康”的评价路径,探讨土壤健康评价的新方法。以河南省温县为例对其进行适用性研究,探讨评价指标、评价方法以及土壤功能与土壤健康间的空间差异,以期丰富和完善耕地土壤健康评价指标体系和方法,平衡区域内粮食生产与环境保护的关系,为耕地土壤资源的可持续利用和管理提供技术支持。

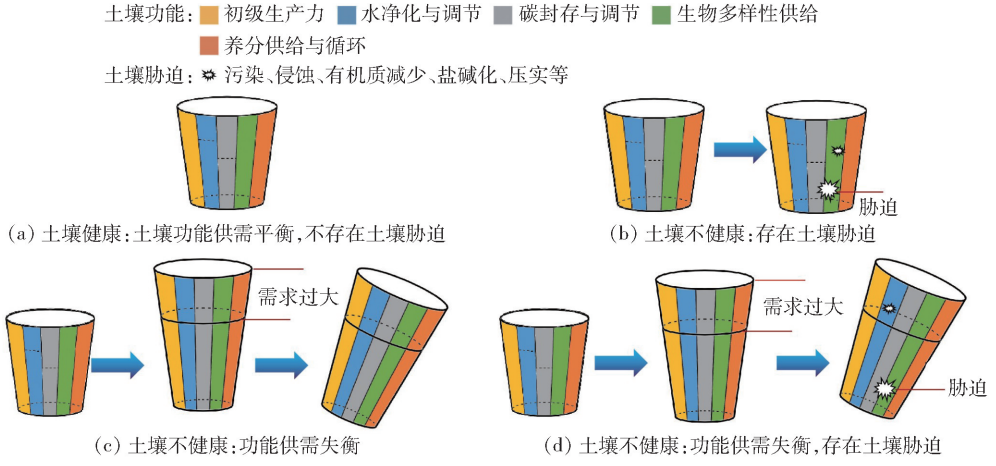
1 理论框架和研究方法

1.1 土壤功能供需、土壤胁迫和土壤健康的关系表达

近年来,土壤功能、土壤生态系统服务与土壤胁迫共同构成了土壤健康评价研究的主要内容[36-37]。人类利用土壤的最终目的是满足基于人类福祉的生态系统服务。千年生态系统评估将生态系统服务定义为“自然过程和组成部分直接或间接提供满足人类需求的商品和服务的能力”[38]。土壤健康状况反映了土壤提供生态系统服务的能力,土壤功能是以土壤为基础的生态系统服务,有助于产生对人类社

会需求和环境有益的商品和服务。土壤功能也是支撑提供生态系统服务的一系列土壤过程[39]，土壤胁迫却是影响这一系列过程的重要危险因素[40]。土壤功能从生态系统传递到社会经济系统为人类所使用，形成功能服务流即为实际供给。人类消费和使用土壤功能所生产的产品和服务，形成功能消费流即为需求。自然、气候、环境、人为活动等因素会在一定程度上影响土壤功能供需状态。尤其是作为耕地的直接使用者，人类需求影响着耕地土壤的利用方向和利用程度，也决定了功能发挥程度。土壤功能实际供给可以被人类社会利用，但为了不断满足人类需求，可能会造成土壤提供商品和服务的能力超过其本身的实际供给能力，导致土壤功能供需失衡，进而产生一定的胁迫作用，如养分失衡、有机质减少、土壤生物多样性减少等。而在耕地系统保持土壤健康的过程中，自然环境灾害和不当的人为活动也会产生一定的胁迫作用，如土壤侵蚀、土壤污染、土壤酸化、盐渍化等。

基于此，本文参照文献[41]利用“木桶结构”阐释的基于土壤功能与胁迫的土壤健康观，初步表达土壤功能供需、土壤胁迫和土壤健康之间的关系（图 1），将初级生产力、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的供给能力类比为组成各个木桶的木板，将土壤健康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（消除土壤胁迫作用），而非一味加高木桶（不断集约化生产满足人类需求而拔高“土壤质量”，不断索取功能服务，造成土壤生态系统结构失调、欠稳定的不可持续状态）。基于“木桶结构”，判断土壤系统是否存在短板、漏洞（胁迫作用）或结构（供需失衡）问题，以判断各种耕地利用类型的土壤健康状况。



(a) 土壤健康：土壤功能供需平衡，不存在土壤胁迫　(b) 土壤不健康：存在土壤胁迫
(c) 土壤不健康：功能供需失衡　(d) 土壤不健康：功能供需失衡，存在土壤胁迫

图 1　耕地土壤功能供需、土壤胁迫和土壤健康的关系表达

Fig. 1　Expression of relationship between supply and demand of farmland soil function, soil threats and soil health

以土壤功能研究见长的欧盟研究团队提出将各类土壤功能评价结果分土地利用类型进行整合，指导功能性土壤管理，以实现土壤健康管护。本文从土壤健康经典定义中的“功能”入手，引入功能性土壤管理理论[42]，基于“功能”供需视角[43]，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，再结合具体耕地利用类型（旱地、水田、水浇地）对土壤功能的需求，探讨土壤功能供需能力和土壤胁迫程度，由此评价土壤健康状况。因此界定“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 5 种土壤功能，且不存在显著土壤胁迫的状态。联合国提出的全球可持续发展目标（SDGs）中有 13 项与土壤有关，消除土壤污染是达到其中 SDG2 “零饥饿”、SDG3 “良好健康与福祉”等几项目标的重要途径和手段[44]。土壤污染影响食物安全、生物安全、人体健康等多个方面。考虑到重金属污染是我国目前耕地安全利用的主要威胁[45]，而土壤有机质减少、养分失衡、酸化等其他土壤胁迫因素都可以在土壤功能的具体评价指标中体现，本文初选重金属污染为威胁土壤健康的目标胁迫作用，结合土壤健康内涵与耕地利用导向，明确 5 种土壤功能的供需与土壤健康状况之间的关系，拟定“评价指标—土壤功能/胁迫—土壤健康”整合评价路径，构建耕地土壤健康评价理论框架（图 2）。基于理论框架，本文基于先验知识，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，形成以表征土壤功能与重金属胁迫为核心的耕地土壤健康评价矩阵。

1.1.1　土壤功能供需判别矩阵

借用木桶理论，健康的农业土壤根据土地利用类型对各种土壤功能的需求存在差异。当人类需求较小或者土壤功能性较高时，土壤功能可以满足人

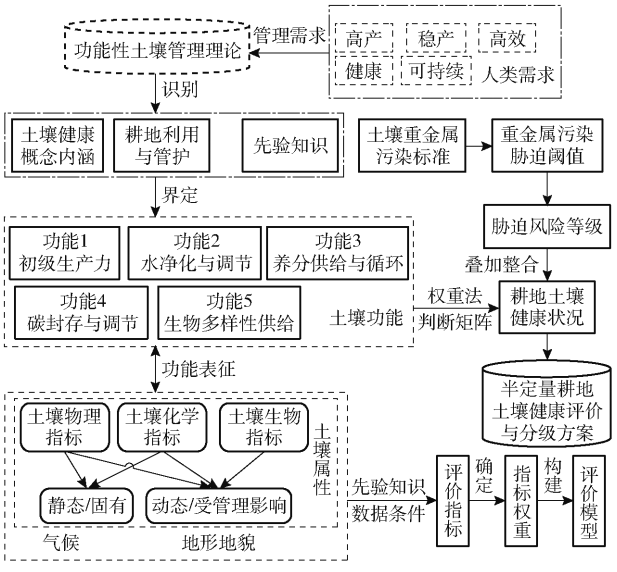
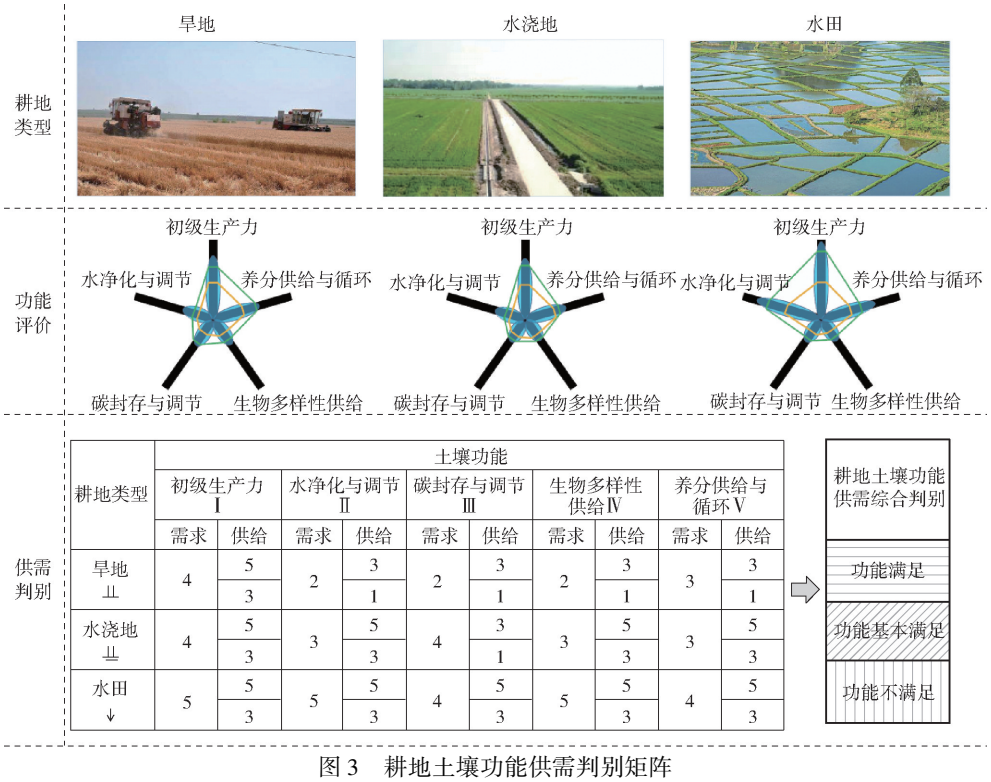


图 2 耕地土壤健康评价的总体框架

Fig. 2 General framework of farmland soil health evaluation

类需求,达到实际供给大于等于人类需求;而当人类需求对土壤功能的利用超过其本身具有的能力,造成实际供给小于等于人类需求。鉴于此,基于土壤功能实际供给与需求之间的过程关系,通过对土壤功能供给能力和人类对土壤功能的需求赋值,建立土壤功能供需矩阵,并选取供需比来解释实际供给与需求之间的盈余关系[46],即表征土壤功能的实际供给是否可以满足当下人类社会的需求。采用生态系统服务价值化法和德尔菲法[47-48],根据专家知识与针对性访谈,为旱地、水浇地、水田 3 种耕地利用类型对 5 种土壤功能的需求和供给能力进行 5 分制赋分,1 ~5 分别代表低需求(供给)到高需求(供给)。将 5 种土壤功能与主要的 3 种耕地利用类型进行关联,构建土壤功能供需判别矩阵。最后将土壤功能供需综合判别结果分为功能满足、功能基本满足和功能不满足 3 类(图 3)。



耕地类型	土壤功能										耕地土壤功能供需综合判别
	初级生产力 Ⅰ		水净化与调节 Ⅱ		碳封存与调节 Ⅲ		生物多样性供给Ⅳ		养分供给与循环Ⅴ		
	需求	供给	需求	供给	需求	供给	需求	供给	需求	供给	
旱地	4	5	2	3	2	3	2	3	3	3	功能满足
		3		1		1		1		1	
水浇地	4	5	3	5	4	3	3	5	3	5	功能基本满足
		3		3		1		3		3	
水田	5	5	5	5	4	5	5	5	4	5	功能不满足
		3		3		3		3		3	

图 3 耕地土壤功能供需判别矩阵

Fig. 3 Farmland soil function supply and demand discrimination matrix

1.1.2 耕地土壤健康评价矩阵(土壤健康分级方案)

在土壤功能供需判别矩阵(图 3)的基础上,根据 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》,将土壤重金属污染胁迫分为优先保护、安全利用和严格管控 3 类风险等级,与土壤功能供需综合判别结果叠加将土壤分为健康、亚健康和不健康 3 个等级,形成土壤健康评价矩阵(图 4)。

耕地土壤功能供需综合判别	土壤重金属污染胁迫		
	优先保护	安全利用	严格管控
满足	健康	健康	不健康
基本满足	亚健康	亚健康	不健康
不满足	亚健康	不健康	不健康

功能满足
功能基本满足
功能不满足

图 4 土壤健康评价矩阵示意图

Fig. 4 Schematic of soil health evaluation matrix

1.2 评价指标选取

影响土壤功能的因素众多,建立的指标体系

须遵循稳定性、主导性、区域性、系统性的原则，选取有代表性、可操作性的指标。按照土壤健康评价总体框架（图 2），本文设定了一套土壤功能评价指标体系（表 1）。其中，指标属性主要包括气候、地形、水分和土壤 4 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自然地理条件，选取了与农业生产密切相关的年积温和年降水量指标，并选取坡度、地貌类型等地形指标来表征区域内的水热状况。考虑到数据获取的难易程度，水分条件选取土壤含水率指标，用于衡量土壤供水和排水能力。此外，参考前人研究[49-50]，选取了土层厚度、土体构型等评价指标，并按照物理、化学和生物分为 3 大类。其中，土壤质地、有机质含量、pH 值等 20 项指标影响初级生产力功能[51]；土层厚度、容重、质地等 10 项指标影响水净化与调节功能[52]；有机质含量、年降水量等 8 项指标影响碳封存与调节功能[53]；土壤呼吸速率、蚯蚓数量等 9 项指标影响生物多样性供给功能[54]；土壤质地、有机质含量等 6 项指标影响养分供给与循环功能[55]。

表 1　土壤功能评价指标体系

Tab. 1　Soil function assessment indicator system

土壤功能	土壤物理指标							土壤化学指标						土壤生物指标		地形地貌		气候条件		水分条件
	土层厚度	土壤容重	土壤质地	粘粒含量	耕作层厚度	团聚体稳定性	土体构型	有机质含量	土壤pH值	阳离子交换量	土壤养分元素含量	土壤有益微量元素含量	可溶性有机碳含量	土壤呼吸速率	土壤蚯蚓数量	坡度	地貌类型	年积温	年降水量	土壤含水率
初级生产力Ⅰ	V	V	V	V	V	V	V	O	O	O	O	O	O	O	O	V	V	V	V	O
水净化与调节Ⅱ	V	V	V	V	V	V		O	O	O										O
碳封存与调节Ⅲ	V	V	V	V				O	O									V	V	
生物多样性供给Ⅳ			V					O	O				O	O	O			V	V	O
养分供给与循环Ⅴ	V		V					O	O	O	O									

注：V、O 表示该属性为评估相应土壤功能的指标，其中，V 表示指标为固有属性，O 表示指标为动态属性。

1.3　研究区概况与数据处理

1.3.1　研究区概况

温县位于豫北平原西部，属河南省焦作市，介于北纬 34°48′30″～35°2′48″，东经 112°51′0″～113°13′30″之间，下辖 10 个乡镇，行政区域总面积 48 130.05 hm^2，耕地总面积为 32 917.17 hm^2，全部为水浇地。温县地处黄河下游，地势西北高、东南低，形成以青峰岭为界限的南滩北洼中间岗地貌特征。青峰岭以南为黄河漫滩，土壤类型以黄潮土为主；青峰岭以北为冲积扇形平原，土壤类型为两合土或褐土化两合土，洼地为淤土。温县全年气候温和，四季分明，年平均气温约 14.4℃，一年两熟制，主要作物为冬小麦和夏玉米，是我国重要的粮食主产区。作为河南省重要的小麦种子生产基地，也是山药、地黄、菊花、牛膝等“四大怀药”产地。近些年来，土地利用者通过增加施用农药和化肥提高农业生产力，导致耕地土壤可能存在环境状况恶化、土壤污染等问题，制约农业生产的可持续发展。

1.3.2　数据来源

以温县第三次全国土地调查中的 5 038 个耕地图斑为研究对象。土体构型、耕层质地数据来自河南省第二次土壤普查数据。有机质含量、pH 值等来自 2018 年 138 个土壤实际采样点数据和农业农村部 2018 年测土配方施肥 2 939 个样点数据。重金属污染等利用 2018 年生态环境部农用地土壤污染详查数据库。土壤蚯蚓数量、微生物量碳含量和土壤呼吸速率数据通过 2018 年 86 个样点实地采样获取。

1.4　综合评价方法

1.4.1　土壤功能供给能力评价

利用多因素综合评价法建立耕地土壤功能供给能力评价模型，计算公式为

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} F_{ij} W_{ij} \tag{1}$$

式中　P_i——第 i 个评价单元的耕地土壤功能供给能力评价分值

F_{ij}——第 i 个评价单元第 j 个评价指标的分级分值

W_{ij}——第 i 个评价单元第 j 个评价指标的权重

1.4.2　土壤功能评价指标权重和分级

为了消除部分指标量纲不同的影响，采用变异系数法确定动态属性指标客观权重，并邀请土地管理、土壤地理等相关专家，采用层次分析法与专家打分相结合的方法确定固有属性指标权重。此外，通过文献分析总结确定各个指标的分级[56]，如表 2 所示。

1.4.3　土壤功能供需比

利用人类需求和土壤实际供给的比值——供需

表 2 土壤功能评价指标分级

Tab. 2 Classification of soil function evaluation indicator

评价指标		指标分级及赋值					
		100	90	80	70	60	40
坡度/(°)		[0,2)	[2,6)	[6,15)		[15,25)	≥25
地形地貌		平原		丘陵		高原	山地
年降水量/mm		≥700	[600,700)		[0,600)		
大于 10℃年积温/℃		≥4 600	[4 550,4 600)	[4 500,4 550)	[0,4 500)		
土壤质地		壤土	黏土		砂土		砾质土
土层厚度/cm		≥150	[100,150)		[60,100)	[30,60)	[0,30)
土壤含水率/%		壤土:[15,25),粘土:[25,30)		壤土:[10,15),粘土:[20,25)		壤土:<10 或≥25,粘土:<20 或≥30	
土壤 pH 值		[6.0,7.9)	[5.5,6.0)或[7.9,8.5)	[5.0,5.5)或[8.5,9.0)		[4.5,5.0)	0~4.5 或≥9.0
粘粒质量分数/%		>35	(25,35]		(15,25]	(10,15]	[0,10]
耕作层厚度/cm		>20	(15,20]		(10,15]		[0,10]
团聚体稳定性系数/%		>45		(30,45]		[0,30]	
有机质质量比/(g·kg^{-1})		≥40	[30,40)	[20,30)	[10,20)	[6,10)	[0,6)
土壤容重/(g·cm^{-3})		[1,1.25)	[1.25,1.35)		[1.35,1.45)	[1.45,1.55)	≥1.55 或 0~1
土体构型		均质质地剖面		夹层质地剖面		体(垫)层质地剖面	
阳离子交换量/(cmol·kg^{-1})		>20	(15,20]		(10,15]		0~10
土壤养分元素含量	全氮质量比/(g·kg^{-1})	>2	1.5~2		1~1.5	0.75~1	0~0.75
	全磷质量比/(g·kg^{-1})	>1	0.8~1		0.6~0.8	0.4~0.6	0~0.4
	全钾质量比/(g·kg^{-1})	>25	20~25		15~20	10~15	0~10
土壤有益微量元素含量	有效铁质量比/(mg·kg^{-1})	>20	10.0~20.0		4.5~10.0	2.5~4.5	0~2.5
	有效硼质量比/(mg·kg^{-1})	>2.0	1.0~2.0		0.5~1.0	0.2~0.5	0~0.2
	有效硒质量比/(mg·kg^{-1})	>3.0	0.40~3.0		0.18~0.40	0.13~0.18	0~0.13
可溶性有机碳质量比/(mg·kg^{-1})		≥100	[80,100)	[60,80)	[40,60)	[20,40)	[0,20)
土壤呼吸速率/(μg·(g·h)$^{-1}$)		>1	(0.8,1]	(0.4,0.8]	(0.2,0.4]	(0.1,0.2]	[0,0.1]
土壤蚯蚓数量		>20	(15,20]	(10,15]		(5,10]	[0,5]

比表征土壤功能从耕地生态系统到社会系统的传递和利用过程,根据供需比将土壤功能供需分为功能满足、功能基本满足和功能不满足 3 类,土壤功能供需比小于 1 时,为盈余状态,表明土壤功能供给能够满足社会需求;供需比等于 1 时,为平衡状态,表明土壤功能供给基本能够满足社会需求;供需比大于 1 时,为亏损状态,表明土壤功能供给不能满足社会需求。

将温县 1 级到 3 级土壤功能供给能力分别赋 5、3、1 分,采用生态系统服务价值化法和德尔菲法,根据专家知识与针对性访谈和统计数据,对温县水浇地利用过程中对土壤功能的需求进行 5 分制赋分,形成温县水浇地土壤功能供需评价矩阵(表 3)。

1.4.4 土壤重金属污染胁迫分类

依据 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中的筛选值 S_i(mg/kg)和管控值 G_i(mg/kg),基于表层土壤中镉、贡、砷、铅、铬含量 C_i(mg/kg),评价耕地土壤污染的风险,按照表层土壤的镉、贡、砷、铅、铬中类别最差的因子确定该点位综合评价结果。以此把土壤重金属污染胁迫划分为优先保护、安全利用和严格管控 3 类风险等级:Ⅰ类:$C_i \leqslant S_i$,土壤污染风险低,可忽

表 3 温县水浇地土壤功能供需判别矩阵

Tab. 3 Discriminant matrix of supply and demand of soil function of irrigated land in Wen County

耕地利用类型	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	
	供给	需求	供给	需求	供给	需求	供给	需求	供给	需求
水浇地	5	4	5	3	5	4	5	3	5	3
	3	4	3	3	3	4	3	3	3	3
	1	4	1	3	1	4	1	3	1	3

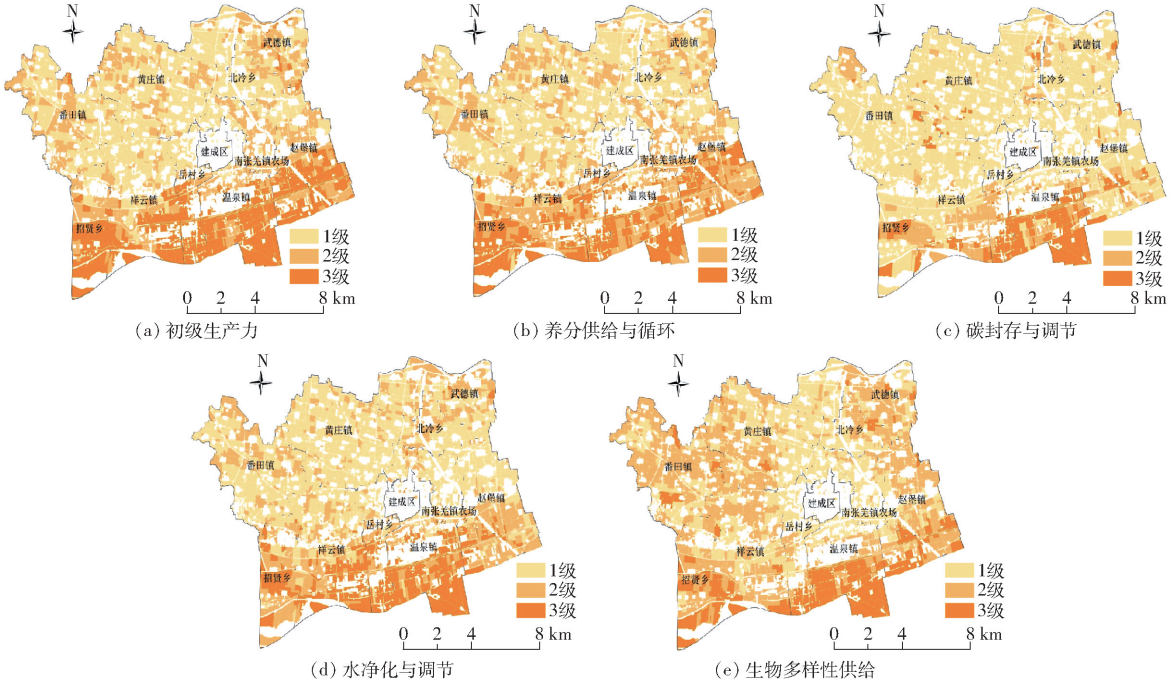
略，应划为优先保护类；Ⅱ类：$S_i < C_i \leqslant G_i$，可能存在土壤污染风险，但风险可控，应划为安全利用类；Ⅲ类：$C_i > G_i$，土壤存在较高污染风险，应划为严格管控类。

2　结果与分析

2.1　土壤功能供给能力空间分异特征

根据提出的指标体系和评价模型，利用自然断点法（Natural breaks）将土壤功能指数划分为 3 个级别，1 级功能最好，得到土壤功能供给能力评价等级分布图（图 5）。

数量结构上，温县耕地土壤初级生产力、养分供给与循环、碳封存与调节、水净化与调节和生物多样性功能供给能力指数分别在 73.34 ~ 92.91、62.96 ~ 91.27、78.83 ~ 92.73、74.43 ~ 95.19 和 70.21 ~ 94.60 之间。其中各类 1 级功能土壤面积分别为 14 336.12 hm^2（43.55%）、14 075.76 hm^2（42.76%）、24 374.31 hm^2（74.05%）、16 802.23 hm^2（51.04%）和 12 197.86 hm^2（37.06%），2 级功能的土壤面积分别为 10 409.21 hm^2（31.62%）、12 585.83 hm^2（38.23%）、4 700.33 hm^2（14.28%）、10 522.40 hm^2（31.97%）和 15 275.28 hm^2（46.41%），其余为 3 级功能的土壤。空间分布上，1 级土壤功能的耕地主要分布在温县的中部和北部以及南部局部地区，分布面积最大的乡镇主要包括黄庄镇、番田镇和祥云镇；3 级土壤功能的耕地主要分布在温县中南部和西南部，分布面积最大的主要是温泉镇、祥云镇和招贤乡。



(a) 初级生产力　(b) 养分供给与循环　(c) 碳封存与调节

(d) 水净化与调节　(e) 生物多样性供给

图 5　温县土壤功能供给能力级别空间分布

Fig. 5　Spatial distribution maps of soil functional supply capacity level in Wen County

2.2　土壤功能供需判别空间分布

通过计算得到温县初级生产力功能供需主要以功能不满足为主（图 6），56.45% 的区域实际供给不能满足现阶段的需求；其余为功能满足区，主要分布在中部和中北部区域，占总面积的 43.55%；养分供给与循环功能不满足区面积最小，占 19.00%，主要分布在南部的部分田块，功能满足区主要分布在中北部，占 42.76%；全县 74.05% 的耕地碳封存与调节功能的实际供给可以满足人类社会对其需求，25.95% 的耕地不能满足这一需求，主要在北部和南部部分区域。水净化与调节和养分供给与循环功能的空间分布规律大致相同，主要呈现中部满足、南部四周不满足的空间格局，超过 50% 的区域处于供给盈余的状态。5 种土壤功能供需空间格局基本呈现由南向北逐渐递增的趋势，以青峰岭为界，中北部土壤功能的供给能力均较强，供需盈余，而南部区域供需处于失衡状态，不能满足功能需求。

2.3　耕地土壤健康空间分异特征

根据 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》中的污染物风险阈值计算得出，温县几乎没有土壤重金属污染胁迫（图 7），94.90% 的耕地土壤属于安全级别，4.99% 的土壤属于警戒水平，0.11% 的土壤需要严格管控利用。参考 COYLE 等[57] 提出的土壤功能供需矩阵，根据耕地利用方式，确定每个土壤功能的权重，其中初级生产力、水净化与调节、碳封存与调节、生

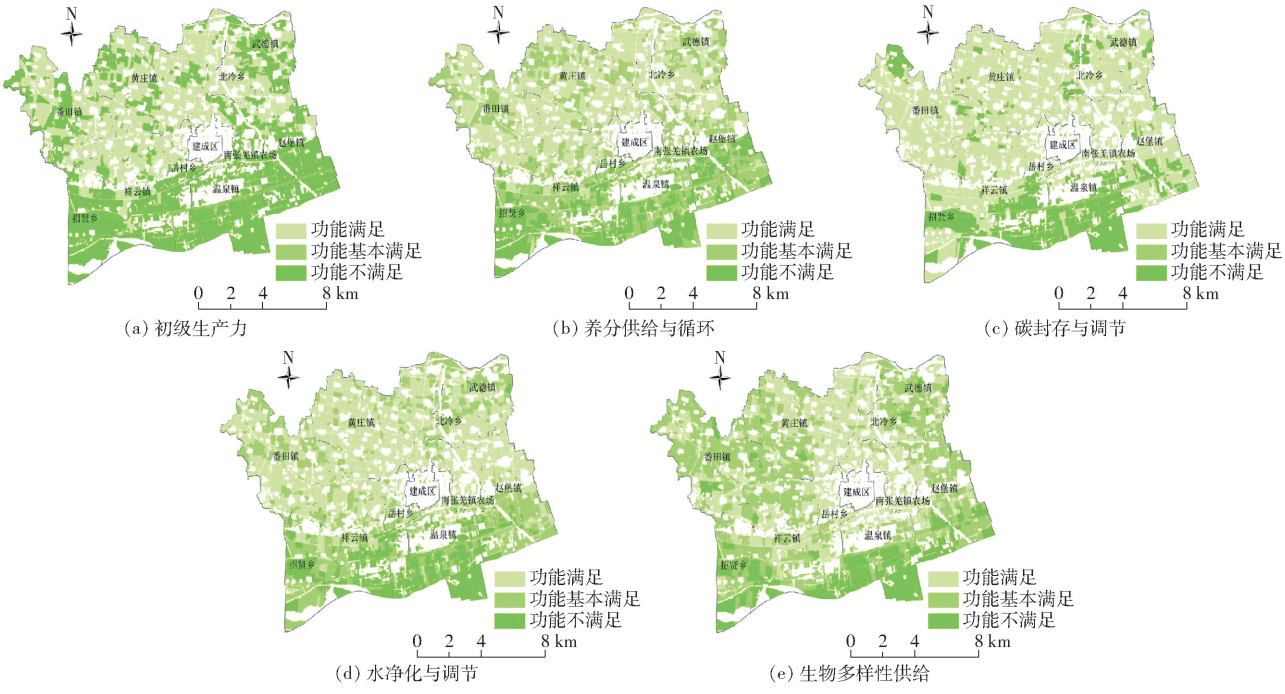


图 6 温县土壤功能供需判别空间分布

Fig. 6 Spatial distribution maps of soil function supply and demand discrimination in Wen County

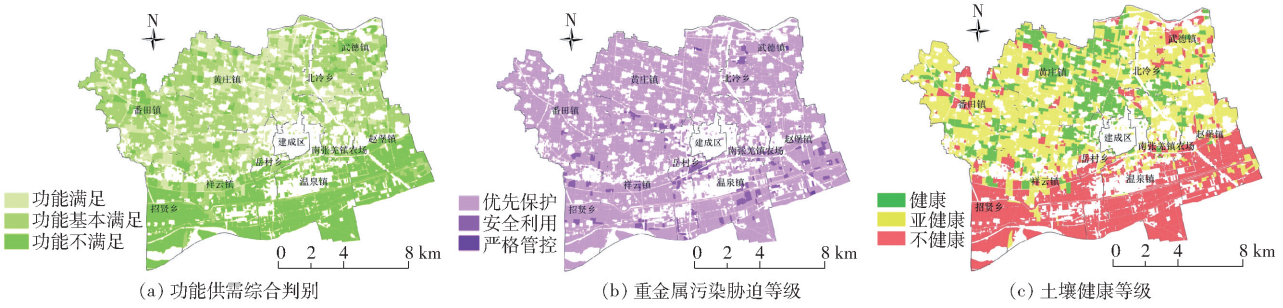


图 7 温县土壤健康等级空间分布

Fig. 7 Spatial distribution maps of soil health level in Wen County

物多样性供给和养分供给与循环的权重分别为 0.691 2、0.034 6、0.024 2、0.024 2 和 0.225 8。通过计算,温县有 5 588.86 hm^2(16.98%)耕地土壤实际供给满足现阶段需求,14 628.35 hm^2(44.44%)耕地基本满足,12 699.95 hm^2(38.58%)耕地不能满足。

将土壤重金属污染胁迫等级与土壤功能供需综合判别结果叠加可知,温县亚健康的土壤面积最多,为 14 616.38 hm^2(44.40%);其次不健康的土壤面积为 12 722.05 hm^2(38.65%),健康的土壤面积最少,为 5 578.74 hm^2(16.95%)。温县不同耕地土壤健康等级交错分布。健康的土壤较散地分布在黄庄镇、番田镇、武德镇、祥云镇的部分田块。健康的耕地土壤类型主要为褐土化岗地两合土、淤土、两合土、小两合土,砂粘比例适中、土壤耕性良好,通透性好、耕作方便、耐旱耐涝、土体深厚透水性强。健康的土壤大多为通体壤,土壤松紧状况适宜,团聚体相对稳定,阳离子交换能力强,土壤养分和有机质含量高,土壤生物活性也相对较高,土壤整体比较肥沃,且多为蒙金土构型,对土壤水、肥、气、热状况调节较好,适宜于作物生长。此外,不存在重金属污染胁迫作用。但是也要注重在这部分耕地上积极采取相应的举措避免不健康因素的产生,重点推动农作物秸秆覆盖还田、免(少)耕播种等保护性耕作技术,增加秸秆覆盖还田比例,增强土壤蓄水保墒能力。不健康的耕地土壤主要分布在青峰岭以南的温泉镇、祥云镇、招贤乡和赵堡镇,主要土壤类型是砂壤土和体砂两合土,土体虽然深厚,但是土壤养分低、保水保肥能力差,容重偏大,通气透水、养分含量中等,并且因为化肥农药的高投入和制革制鞋产业导致少量的重金属污染胁迫。这部分耕地要注重“用养结合”,增施有机肥和种植绿肥相结合,增施土壤改良剂,改善土壤的吸附性能,保护土壤生物多样性,实施化肥农药减施增效计划,减轻土壤的“负担”。其余均为亚健康的土壤分布,有少量的土壤偏紧实,土壤蓄水保肥能力相对较高,有机质含量也较高,生物活性较强。这部分耕地要注重深耕深松,秸秆还田,

增加作物多样性，适当增施有机肥，培肥土壤，改善土壤结构，增加土壤的透气、透水和保肥能力，恢复土壤活力。

3　讨论

本文土壤健康评价主要参考了欧盟 Horizon2020 - LANDMARK 评价系统，侧重探讨评估方法，除考虑土壤生产功能外，还考虑了其他的土壤功能，并且每项功能都有各自对应的评价指标。有针对性地选取指标，覆盖气象、地形、水文、土壤理化生性质等多方面，能大体反映出各土壤功能的实际状态和特点。土壤健康分级方案凸显了重金属污染的胁迫作用，且土壤不健康的类型和程度也受关注。土壤胁迫类型不仅包括污染，还应包括侵蚀、酸化、碱化、沙化、水土流失等，虽然本文选取的评估指标都能一定程度反映土壤健康（功能）的限制和胁迫因素，但是还需研究具体的田块土壤不健康限制因素，为科学的土壤管理和改良提供明确的方向，实现耕地资源的精细化风险管理。

在耕地土壤健康理论研究缺位和实践方案存在缺陷的背景下，本文总结并融合德国 M - SQR 评估方案和美国康奈尔土壤健康评估指标，引入欧盟功能性土壤管理理论，将耕地土壤健康解构为与农业生产相关的土壤功能，再结合具体耕地利用类型（旱地、水田、水浇地）对土壤功能的需求，探讨土壤功能供需能力和土壤胁迫程度，由此评价土壤健康状况。评价理念和方法具有一定的依据，并合理利用各土地管理部门相关的土壤调查评价基础数据，节约了人力与资本的投入，可以初步作为中国县域尺度耕地土壤健康评价的实用性参考框架。但实证研究区只有水浇地这一种耕地利用类型，部分指标的分级量化可能只根据研究区实测数据的差异性，不一定适合于其他区域。中国幅员辽阔且地域差异较大，仍需要针对区位条件及土壤特点，选择耕地利用类型多样的区域进行验证，提高耕地土壤健康评价方法的科学性。此外，耕地土壤健康评价结果准确与否也直接影响到其成果的应用效果，科学验证耕地土壤健康评价方法的可靠性值得重点关注和进一步研究。

4　结论

（1）基于功能性土壤管理理论，参考改进了欧美相关土壤健康和土壤功能评价的主流技术路线，设计了基于土壤功能表征结果和重金属胁迫风险管控叠加的土壤健康分级方案。定义并量化了耕地（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，实现了从土壤功能与胁迫到土壤健康的表达，丰富和完善了目前耕地土壤质量（健康）评价指标体系。以豫北平原粮食主产区——河南省温县为例，根据构建的评价指标体系，采用定性和定量相结合的方法，对耕地土壤功能、土壤健康状况分别进行了量化评估。

（2）温县耕地土壤初级生产力、水净化与调节、碳封存与调节、生物多样性供给、养分供给与循环功能供需空间格局基本呈现由南向北逐渐递增的趋势，以青峰岭为界，中北部土壤功能的供给能力均较强，处于盈余状态，而南部区域供需处于失衡状态，不能满足功能需求。温县亚健康的土壤面积最多，为 14 616.38 hm^2（44.40%）；其次是不健康的土壤面积为 12 722.05 hm^2（38.65%）；健康土壤面积最少，为 5 578.74 hm^2（16.95%）。土壤质地、土体构型、土壤养分、土壤生物活性和重金属污染胁迫是导致县域内土壤健康空间分异的主要因素。

（3）应将土壤改良工程与土地整治工程相结合，改善土壤结构，深耕翻土，施用有机肥，同时平整土地，增加灌溉设施，构建合理的田水路林渠体系，从而保护土壤生物多样性，保障土壤资源持续高效安全利用，满足耕地土壤健康管护需求。

参　考　文　献

[1] 杨颖，郭志英，潘恺，等. 基于生态系统多功能性的农田土壤健康评价[J/OL]. 土壤学报，http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210112.1619.006.html.

[2] JOHANNES L，DEBORAH A B，INGRID K K，et al. The concept and future prospects of soil health[J]. Nature Reviews Earth & Environment，2020，10(1)：544 - 553.

[3] 高璐璐，张超，吕雅慧，等. 耕地健康产能多要素评价体系构建与应用[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(5)：215 - 222. GAO Lulu，ZHANG Chao，LÜ Yahui，et al. Construction and application of multi-factor cultivated land health productivity evaluation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(5)：215 - 222. http://www.j-csam.org/icsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file=20200524&flag=1. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.024.（in Chinese）

[4] KARLEN D，VEUM K S，SUDDUTH K A，et al. Soil health assessment：past accomplishments，current activities，and future opportunities[J]. Soil & Tillage Research，2019，195：104365.

[5] 张桃林. 守护耕地土壤健康 支撑农业高质量发展[J]. 土壤，2021，53(1)：1 - 4.

ZHANG Taolin. Protect the soil health of cultivated land and support the high-quality development of agriculture[J]. Soils, 2021, 53(1):1 - 4. (in Chinese)
[6] LAL R, MOHTAR R H, ASSI A T, et al. Soil as a basic nexus tool: soils at the center of the food-energy-water nexus[J]. Current Sustainable/Renewable Energy Reports, 2017, 4:117 - 129.
[7] ANDERA F, BINI C, AMADUCCI S. Soil and ecosystem services: current knowledge and evidences from Italian case studies [J]. Applied Soil Ecology, 2018, 123: 693 - 698.
[8] RAQUEL L S, MAMEN C P, JORIS D V. Participatory selection of soil quality indicators for monitoring the impacts of regenerative agriculture on ecosystem services[J]. Ecosystem Services, 2020,45:101157.
[9] LEOPOLD A. Wilderness as a land laboratory[J]. Living Wilderness, 1941, 7(6): 3.
[10] NORRIS C E, BEAN G M, CAPPELLAZZI S B, et al. Introducing the North American project to evaluate soil health measurements[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(4): 3195 - 3215.
[11] 刘宝涛, 郅瑞卿, 王冬艳, 等. 基于灰色关联模型的吉林省土地利用系统健康诊断[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(10):9 - 17.
LIU Baotao, QIE Ruiqing, WANG Dongyan, et al. Health diagnosis on land use system based on grey correlation model—a case study of Jilin Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(10):9 - 17. (in Chinese)
[12] 赵瑞, 吴克宁, 刘亚男, 等. 基于生态系统服务功能视角的县域尺度土壤健康评价[J]. 土壤通报, 2020, 51(2):269 - 279.
ZHAO Rui, WU Kening, LIU Ya'nan, et al. Soil health evaluation at a county level based on soil ecosystem service function [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(2):269 - 279. (in Chinese)
[13] 李强, 严金明, 赵烨. 耕地健康也需诊断[J]. 中国土地, 2011(11):37 - 39.
[14] 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.
ZHAO Rui, WU Kening, ZHANG Xiaodan, et al. Evaluation on farmland health productivity in main grain production areas: a case study in Wen County of Henan Province[J]. China Land Science, 2019, 33(2): 67 - 75. (in Chinese)
[15] ANDREWS S S, KARLEN D L, CAMBARDELLA C A. The soil management assessment framework[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68: 1945 - 1962.
[16] 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.
[17] 盛丰. 康奈尔土壤健康评价系统及其应用[J]. 土壤通报,2014,45(6):1289 - 1296.
SHENG Feng. Introduction and application of Cornell soil health assessment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(6): 1289 - 1296. (in Chinese)
[18] PURAKAYASTHA T J, PATHAK H, SAVITA K, et al. Soil health card development for efficient soil management in Haryana, India[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191:294 - 305.
[19] STONE D, RITZ K, GRIFFITHS B, et al. Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 97:12 - 22.
[20] 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.
YANG Qijun, WU Kening, FENG Zhe, 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. (in Chinese)
[21] LAL R. Soil health and carbon management[J]. Food Energy Secur, 2016, 5(4):212 - 222.
[22] TECHEN A K, HELMING K. Pressures on soil functions from soil management in Germany. A foresight review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2017, 37(6):64.
[23] BOUMA J, DROOGERS P. Translating soil science into environmental policy: a case study on implementing the EU soil protection strategy in the Netherlands[J]. Environmental Science & Policy, 2007, 10(5):454 - 463.
[24] TSCHERNING K, HELMING K, KRIPPNER B, et al. Does research applying the DPSIR framework support decision making? [J]. Land Use Policy, 2012, 29(1):102 - 110.
[25] VAN BEEK C L, TOTH T, HAGYO A, et al. The need for harmonizing methodologies for assessing soil threats in Europe[J]. Soil Use & Management, 2010, 26(3):299 - 309.
[26] TÓTH G, GARDI C, BÓDIS K, et al. Continental-scale assessment of provisioning soil functions in Europe[J]. Ecological Processes, 2013, 2(1): 1 - 18.
[27] 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.
WU Kening, LIANG Siyuan, JU Bing, et al. Research review on classification and evaluation of soil functions[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011,42(4): 980 - 985. (in Chinese)
[28] 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.
[29] 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(15): 1484 - 1491.
[30] DEBELJAK M, TRAJANOV A, KUZMANOVSKI V, et al. A field-scale decision support system for assessment and management of soil functions[J]. Frontiers in Environmental Science, 2019, 7: 115.
[31] VAN LEEUWEN J, CREAMER R, CLUZEAU D, et al. Modeling of soil functions for assessing soil quality: soil biodiversity and habitat provisioning[J]. Frontiers in Environmental Science, 2019, 7: 113.
[32] KUZYAKOV Y, GUNINA A, ZAMANIAN K, et al. New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7(3): 282 - 288.
[33] MAHARJAN B, DAS S, ACHARYA B S. Soil health gap: a concept to establish a benchmark for soil health management[J].

Global Ecology and Conservation, 2020, 23: e01116.
[34] LI Z, LUN F, LIU M, et al. Rapid diagnosis of agricultural soil health: a novel soil health index based on natural soil productivity and human management[J]. Journal of Environmental Management,2021, 277:111402.
[35] 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.
ZHANG Junling, ZHANG Jiangzhou, SHEN Jianbo, et al. Soil health and agriculture green development: opportunities and challenges[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4):783 - 796. (in Chinese)
[36] 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.
[37] 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.
[38] 马琳, 刘浩, 彭建, 等. 生态系统服务供给和需求研究进展[J]. 地理学报, 2017, 72(7):1277 - 1289.
MA Lin, LIU Hao, PENG Jian, et al. A review of ecosystem services supply and demand[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7):1277 - 1289. (in Chinese)
[39] PAUL C, KUHN K, STEINHOFF-KNOPP B, et al. Towards a standardization of soil-related ecosystem service assessments [J]. European Journal of Soil Science, 2020: 1 - 16.
[40] 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: 685 - 701.
[41] 吴克宁, 杨淇钧, 赵瑞. 耕地土壤健康及其评价探讨[J/OL]. 土壤学报, http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210119.1352.002.html.
[42] DINGKUHN E L, ALEXANDER W, FELIX J J A, et al. A multi-method approach for the integrative assessment of soil functions: application on a coastal mountainous site of the Philippines[J]. Journal of Environmental Management,2020, 264: 110461.
[43] 周丁扬, 李抒函, 文雯,等. 基于供需视角的河南省耕地多功能评价与优化[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(11): 272 - 281.
ZHOU Dingyang, LI Shuhan, WEN Wen, et al. Multi-function evaluation and optimization of cultivated land in Henan Province based on perspective of demand and supply[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):272 - 281. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20201130&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.030. (in Chinese)
[44] LEE B X, KJAERULF F, TURNER S, et al. Transforming our world: implementing the 2030 agenda through sustainable development goal indicators[J]. Journal of Public Health Policy, 2016, 37(Supp.1):13 - 31.
[45] 张秋霞,张合兵,张会娟,等.粮食主产区耕地土壤重金属高光谱综合反演模型[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3): 148 - 155.
ZHANG Qiuxia, ZHANG Hebing, ZHANG Huijuan, et al. Hybrid inversion model of heavy metals with hyperspectral reflectance in cultivated soils of main grain producing areas[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(3):148 - 155. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170319&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.019. (in Chinese)
[46] 管青春,郝晋珉,许月卿, 等. 基于生态系统服务供需关系的农业生态管理分区[J].资源科学,2019,41(7):1359 - 1373.
GUAN Qingchun, HAO Jinmin, XU Yueqing, et al. Zoning of agroecological management based on the relationship between supply and demand of ecosystem services[J]. Resources Science, 2019,41(7):1359 - 1373. (in Chinese)
[47] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243 - 1254.
XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243 - 1254. (in Chinese)
[48] BURKHARD B, KROLL F, NEDKOV S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budget[J]. Ecological Indicators, 2012, 21:17 - 29.
[49] GREINER L, NUSSBAUM M, PAPRITZ A, et al. Assessment of soil multi-functionality to support the sustainable use of soil resources on the Swiss Plateau[J]. Geoderma Regional, 2018(14): e00181.
[50] JOÃ D A B, ANGHINONI I, DE MORAES M T, et al. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems[J]. Soil & Tillage Research, 2017, 174:104 - 112.
[51] SANDÉN T, TRAJANOV A, SPIEGEL H, et al. Development of an agricultural primary productivity decision support model: a case study in France[J]. Frontiers in Environmental Science,2019,7:58.
[52] BURAUEL P, BAβMANN F. Soils as filter and buffer for pesticides-experimental concepts to understand soil functions[J]. Environmental Pollution, 2005, 133(1): 11 - 16.
[53] 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.
[54] HOBLEY 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.
[55] TIBBETT M, FRASER T D, DUDDIGAN S. Identifying potential threats to soil biodiversity[J]. PeerJ, 2020, 8: e9271.
[56] 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.
[57] 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(19):39 - 48.