

耕地土壤健康评价的一种新方法及其应用

Hussain Zakir^{1,2}, 邓利梅^{1,2}, 汪璇^{1,2}, 崔荣阳^{1,2}, 周涛^{1,2}, 刘刚才¹

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:耕地土壤健康是粮食安全的基础,但目前还没有统一的内涵和评价方法。本研究基于人生理健康的内涵,提出了土壤健康评价的“三套对偶”评价指标体系及评价方法,综合考虑了土壤专家、管理者和生产者三者的评价指标,评价指标有系统性和针对性,并采用指标比值法评价土壤健康状况,评价方法简单。基于四川盐亭县第二次土壤普查的成果资料和最近的采样测试分析,应用该方法对该县耕地土壤进行健康评价,结果表明:①研究区>80%的土壤为健康状态;②在当前的耕种和管理方式下,该区健康和退化的土壤比例都有增加趋势,说明当前的耕种和管理模式,在针对性和精准性方面还有待完善。该评价方法合理可行可靠。

关键词:耕地;土壤健康;新方法;应用研究;紫色土

中图分类号:S154.1 **文献标志码:**A

A new method of farmland soil health assessment and its application

Hussain Zakir^{1,2}, DENG Li-mei^{1,2}, WANG Xuan^{1,2}, CUI Rong-yang^{1,2}, ZHOU Tao^{1,2}, LIU Gang-cai¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil health is the base of food security, however, there is no unified connotation and evaluation method of soil health at present. Based on the connotation of human physiological health, this study proposed the ‘three sets of dual’ evaluation index system of soil health evaluation, comprehensively considering the evaluation indexes of soil experts, managers and producers, which is systematic and targeted, and the index ratio method that is used to evaluate the health status of soil, which is simple. Based on the results of the second soil survey in Yanting county, Sichuan Province, and the recent sampling test analysis, this method was applied to evaluate the health of cultivated soil in this county. The results showed that: (i) More than 80% of the soil in the study area was in a healthy state; (ii) Under the current cultivation and management mode, the proportion of healthy and degraded soil in the area had an increasing trend, indicating that the current cultivation and management mode still needs to be improved in terms of pertinence and accuracy. Therefore, the proposed method is simple, reasonable and reliable.

Key words: Farmland; Soil health; New method; Application study; Purplish soil

健康、绿色和文明是当代可持续发展的主题。耕地土壤健康是粮食安全的基础,而耕地土壤健康评价又是耕地健康保育的基础,因此,科学简单可行的土壤健康评价方法,对维持和提升耕地健康与其生产力都具有重要意义。“土壤健康”是英国生态学家 Balfour^[1]在 1947 年的著书《生命的土壤》中提出来的。不同的学者对土壤健康的定义不同:周启星^[2]指出“土壤健康”的判断标准是能生产出对人体

具有健康效益的动植物产品,并能改善水和大气质量、抵抗污染物,也能促进植物、动物、微生物以及人体健康的能力;陶宝先等^[3]指出,土壤健康是指土壤处于一种良好的结构和功能状态,能提供稳定和可持续的生物生产力,维护生态平衡,促进生物健康,不会出现退化,不对环境造成危害的动态过程;Doran 等^[4]认为:土壤健康是土壤持续维持生物生产力、促进空气和水环境的质量,以及植物、动物和人

收稿日期:2022-06-13

基金项目:四川省重点研发项目(2021YFN0010)

第一作者:Zakir Hussain(1996-),男,在读硕士,研究方向为土壤肥力与水土保持。E-mail:Zakir.shigri@gmail.com

通讯作者:刘刚才(1967-),研究员,主要从事土壤侵蚀与土壤肥力研究。E-mail:liuge@imde.ac.cn

类健康的能力;联合国粮农组织(FAO)在2011年将“土壤健康”定义为“土壤作为一个生命系统具有的维持其功能的能力”^[5]。总体而言,目前多数研究者认为“土壤质量”与“土壤健康”同义^[6]。土壤健康的评价指标体系,通常包括土壤的物理、化学和生物三方面的性能指标^[7-11]。但是,不同的研究者采用的评价指标明显不同:曹红雨等^[12]选取土壤容重等8项指标,评价了木兰围场典型林分的土壤健康;于法展等^[13]则选取了包括枯落物层厚度等14个指标,评价了庐山不同森林的土壤健康状况;蔡小溪和吴金卓^[14]认为:土壤健康评价应加上土壤形态方面的指标如土壤厚度等;有研究^[15-16]认为:土壤污染物如重金属等也应是土壤健康评价的指标;最近,有研究者^[17-21]提出,土壤健康评价应该包括土壤服务功能如调节、支持和供应等方面的指标。目前,常用的土壤健康评价方法主要有土壤质量指数法等7种^[19,22]。从目前的相关研究反映出:①土壤学家与生态学家至今仍未对土壤健康概念达成一致,在不同时期、不同领域,不同的研究者对土壤健康的定义都有所区别和侧重;②土壤健康与土壤质量没完全区分,而且多数研究者认为这二者是同义的;③由于健康的内涵不清,健康评价指标体系及方法十分不统一,但仍然是土壤质量评价指标体系及方法,这种体系及评价结果,对土壤个体而言,不能反映土壤的非健康要素,因而不能明确土壤的培育方向。为此,本研究以人生理健康的内涵为理念,定义耕地土壤健康为:耕地各要素指标值在其健康的标准值或范围内,即耕地的各要素指标值为健康值;也就是说,在特定区域和作物下,土壤表现为其营养和功能等能完全满足特定作物生长发育需要的土壤为健康土壤,可以用特定区域内无障碍功能或产量产值最好的耕地土壤作为健康土壤标准;同时,统筹考虑土壤专家、管理者和生产者,对土壤健康评价的不同衡量指标,以构建耕地土壤健康的评价指标体系和方法,并在四川盐亭县紫色土耕地上进行应用研究。

1 土壤健康评价指标体系

根据上述的耕地土壤健康内涵和思路,土壤健康评价的指标体系为:三套(功能指标体系*i*、营养指标体系*j*和产出指标体系*k*)对偶(土壤功能指标当前值 C_i 与作物需求的土壤功能指标健康值 E_i 、土壤营养指标当前值 C_j 与作物需求的营养指标健康值 E_j 和作物的产出指标当前值 C_k 与产出指标期望值 E_k)指标体系(表1)。值得说明的是:表1中的第三级指标,可以根据具体土壤需要评价(诊断)的方

面,增减需要评价的指标,就像医生诊断病人一样,不同病人需要评测不同的指标。

2 土壤健康评价方法

2.1 评价指标健康值(或期望值) E 及当前值 C 的确定

E 值除了根据相关的研究成果,确定有关指标的健康或期望值 E 外,与确定当前值 C 一样,采取调查研究和采样分析的方法,确定各评价指标的 E 和 C 值。

土壤采样地点和时间:在需要进行健康评价的耕地区域,在作物生长、产量和品质都最好的地块上,每个土壤类型上选择4~6个代表性地块,进行调查和采样,以确定 E 值;在需要进行健康评价的地块上同样地调查和采样,以确定 C 值。在施肥前或作物收获后进行采样。

土壤采样层次:为了简便快捷确定土壤健康状况,主要采集耕地的耕层土壤即0~20 cm土层的土壤。

土壤采样类型。土壤混合样:每个采样点(地块)采集土壤混合样1个,每个混合样由5~8个点样混合而成。土壤环刀样:环刀(100 cm³)采取原状土壤,每个采样点(地块)采集3~5个。土壤微生物样:与混合样采样一致,只是需要冷藏。

室内分析项目与方法:①土壤功能指标*i*土壤容重、田间持水量、凋萎系数:压力膜仪法测定环刀样;土壤有机质、阳离子交换量CEC、土壤pH和土壤酶活性等,采用常规分析方法^[23]进行测定;土壤微生物量、功能基因和类群等,采用高通量测序方法;②土壤营养指标*j*土壤大量和微量养分全量和有效量等,采用常规分析方法^[23]进行测定;③土壤产出指标*k*产量和收益:田间测产和出售登记计算;产品品质:按相应产品品质测定方法测定^[24]。

2.2 土壤健康的评价方法

本研究采用三套对偶指标的比值来进行土壤健康的评价,即土壤功能方面的指标当前值 C_i /其指标健康值 $E_i=R_i$,土壤营养方面的指标当前值 C_j /其指标健康值 $E_j=R_j$,以及作物产出指标的当前值 C_k /其期望值 $E_k=R_k$,分别评价土壤的功能、营养和产出三方面的健康状况(表2)。

上述比值过程中,如分子小于分母的,则分子除以分母的最小值,反之,分子大于分母的,则分子除以分母的最大值。如指标是定性指标,如微生物主要功能基因和微生物类群的多少,产品品质,等等,事先按相关情况赋值(0~1.0)(如多、中、少、极少或好、一般、差、极差,可分别赋值为1、0.8、0.6、0.4)后,再求比值。健康程度的评价方法如表2所示。

表1 土壤健康评价的指标体系
Table 1 Three sets of dual index system for soil health evaluation

“三套”(i, j 和 k)指标体系 'Three sets'(i, j, and k) index system			“对偶”(C-E)指标 'Dual'(C-E) indicators				
一级指标	二级指标	三级指标 i 容重	功能指标当前值 C_i	功能指标健康值 E_i			
功能 指标体系 (专家权衡的指标)	水气调控	田间持水量 凋萎系数 阳离子交换量 CEC					
	营养调控	有机质 碳氮比 C/N 土壤厚度 pH 微生物量					
	综合调控	微生物主要功能基因 微生物类群 土壤酶活性					
	一级指标	二级指标			三级指标 j	营养指标当前值 C_j	营养指标健康值 E_j
	营养 指标体系 (管理者权衡的指标)	大量元素			全氮 全磷 全钾		
					有效氮 有效磷 有效钾		
氮磷比 氮钾比							
有效锌							
有效硼							
有效钼							
一级指标	二级指标	三级指标 k	产出指标当前值 C_k	产出指标期望值 E_k			
产出 指标体系 (业主或用户权衡的指标)	宏观	产量 收益					
	微观	产品品质					

注: i, j 和 k 是 1, 2, 3, …, n。

需要说明的是:表2中的分级标准,只是作者根据已有的研究经历和相关文献资料,提出的分级建议,不同区域不同土壤的这个标准可能不同;总之,该标准还有待于进一步的检验和完善。

3 土壤健康评价的应用

3.1 应用区的概况

本方法的应用研究区为四川省盐亭县,该县地处四川盆地丘陵区中北部,位于 105° 12' 17"~105°

43' 20" E, 30° 58' 31"~31° 39' 40" N, 全县总面积 1645 km², 具有紫色土及其区域的代表性和典型性(土壤主要为石灰性紫色土,土壤母质为蓬莱镇组)。

盐亭县属中亚热带湿润季风气候区,四季分明;气候温和,多年年均气温 17.5 °C;降水集中于夏季,年均降雨量 826 mm;盛夏暴雨不多,夏日雨热同季,光热资源丰富;秋冬常雾,入秋细雨绵绵;冬季干温多雾,霜期历时短,无霜期 290 d。盐亭县主要森林植被类型为人工柏木林或桉柏混交林。旱地

表2 土壤健康程度评价方法
Table 2 Evaluation method of soil health status

比值(R_i, R_j, R_k)偏离“1”及其健康程度分级 The deviating degree of index ratio ($R_i, R_j, \text{ and } R_k$) from '1' and index health level grading		土壤总体健康程度分级 Number of different health level indicators and overall soil health level grading	
程度 Degree	分级与健康程度 Grading and health level	指标数量, $m = n_i + n_j + n_k$ Number of indicators, $m = n_i + n_j + n_k$	健康程度 Health level
$0 \leq R_i \text{ 或 } R_j \text{ 或 } R_k - 1 < 0.2$	0, 健康	大于或等于 80% 的指标满足“0”级	健康
$0.2 \leq R_i \text{ 或 } R_j \text{ 或 } R_k - 1 < 0.4$	1, 亚健康	大于或等于 20% 的指标满足“1”级	亚健康
$0.4 \leq R_i \text{ 或 } R_j \text{ 或 } R_k - 1 < 0.6$	2, 虚弱	大于或等于 20% 的指标满足“2”级	虚弱
$0.6 \leq R_i \text{ 或 } R_j \text{ 或 } R_k - 1 $	3, 退化	大于或等于 20% 的指标满足“3”级	退化

农田作物以小麦、玉米、甘薯为主,水田以水稻、油菜或小麦为主。

3.2 评价指标值获取

根据《盐亭县第二次土壤普查资料》的全部耕地调查记载,确定了3个耕地地块为健康标准地块,即E值的采样点,并选择了其余7个地块为健康评价地块,即C值的采样点,采样点基本信息如表3,于2021年4月对这些样点进行了耕层(0~20 cm)采样,然后采用相关的方法(同上),对上述表中的相关指标进行了测定,结果如表4。

3.3 评价结果

3.3.1 当前土壤的健康概况 根据2021年采样测定的指标及上述评价方法,结果表明,研究区健康的土壤占62%,亚健康的占20%,虚弱的占11%,退化的占7%(图1),即研究区目前超过一半的土壤是健康

的,非健康(虚弱和退化)的土壤不足20%,总体上看本区土壤健康状况良好。

从不同样点来看,利和五村土壤的健康、亚健康 and 虚弱的指标分别为52%、40%和8%,没有退化指标;八角民主村土壤的健康、亚健康和退化的指标分别为92%、4%和4%,但无虚弱指标;金孔七村采样点土壤的健康、亚健康、虚弱和退化的指标分别为20%、36%、20%和24%;金孔一村采样点土壤的健康、亚健康、虚弱和退化的指标分别为24%、48%、20%和8%;黑坪二村采样点土壤的健康、亚健康、虚弱和退化的指标分别为68%、8%、16%和8%;来龙金罐村采样点土壤的健康、亚健康和虚弱的指标分别为88.8%、8.0%和4.0%;石牛庙二村采样点土壤的健康、亚健康和退化指标分别为88.8%、8.0%和4.0%。

表3 采用点的基本信息

Table 3 The basic information of sample sites

编号 Sample ID	地点 Site	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔(m) Elevation
E1	两河乡高团村5组	31°09'42.13"	105°24'22.20"	387
E2	四桂乡三村5组	31°13'52.28"	105°18'43.96"	363
E3	麻秧乡五村1组	31°01'07.92"	105°39'21.68"	368
C1	利和乡五村12组	31°11'34.67"	105°30'35.84"	407
C2	八角乡民主村12组	31°10'24.21"	105°37'33.30"	423
C3	金孔乡七村5组	31°04'59.05"	105°39'15.94"	432
C4	金孔乡一村4组	31°21'18.07"	105°26'39.58"	547
C5	黑坪乡二村8组	31°26'07.77"	105°19'51.66"	610
C6	来龙乡金灌村12组	31°05'43.31"	105°39'20.69"	451
C7	石牛庙乡二村2组	31°26'37.38"	105°27'54.96"	671

注:盐亭县土壤普查办公室. 四川省盐亭县土壤普查上报表格资料,1985。

表4 采样点相关指标的测定结果

Table 4 The measurement data of the relevant indicators of the sampled soil

测定指标 Soil attributes	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	变异系数(%) C _v
容重(g/cm ³)	1.49	1.33	1.66	7.60
田间持水量(%)	21.51	18.18	25.47	9.80
萎焉系数(%)	16.08	10.44	20.57	18.70
阳离子交换量(mmol/kg)	202.49	184.04	281.72	16.60
有机质含量(%)	1.69	0.52	2.65	35.30
酸碱度pH	8.10	8.00	8.50	2.20
微生物量碳(mg/kg)	220.49	151.48	281.71	15.90
微生物量氮(mg/kg)	34.18	26.81	46.23	16.50
微生物量磷(mg/kg)	9.04	5.25	12.77	24.60
蔗糖酶(mg/g)	61.15	32.21	73.38	21.10
脲酶(mg/g)	15.20	10.18	17.55	15.20
多酚酶(mg/g)	0.19	0.06	0.30	34.30
葡萄糖酶(mg/g)	0.08	0.06	0.10	0.37
蛋白酶(mg/g)	0.24	0.14	0.29	18.90
纤维素酶(mg/g)	0.20	0.06	0.28	10.57
全氮含量(%)	0.09	0.04	0.16	36.80
全磷含量(%)	0.07	0.05	0.12	29.30
全钾含量(%)	3.58	3.07	4.20	10.60

续表4 Continued table 4

测定指标 Soil attributes	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	变异系数 C_v (%)
有效氮含量(mg/g)	97.30	57.00	116.00	19.7
有效磷含量(mg/g)	9.85	4.60	33.10	82.8
有效钾含量(mg/g)	119.50	62.00	280.00	66.8
碳氮比	10.14	7.73	11.93	12.0
氮磷比	1.29	0.72	2.11	33.7
氮钾比	0.03	0.01	0.05	40.9

3.3.2 土壤健康的变化情况 对照第二次土壤普查测定的指标(主要缺少表4中土壤微生物N、C、P和酶活性方面的指标),采用上述方法进行评价,结果表明,1980s时7个采样点的健康、亚健康、虚弱和退化的比例分别为51%、24%、20%和5%,而2021年时7个采样点的健康、亚健康、虚弱和退化的比例分别为58%、17%、14%和11%,健康和退化的土壤分别增加7%和6%,而亚健康和虚弱的土壤则减少7%和6%(图2);说明在研究区长期以来的耕种和管理技术模式,一方面使部分土壤向健康状态发展,而另一部分土壤又向退化状态发展,也就是说,这些耕种和管理技术模式,还不是完全合理和精准的,导致了部分土壤向退化状态发展。

4 讨论

从上述结果表明,本评价的指标体系层次和对象十分清晰:采用“三套对偶评价指标体系”,即土壤现有的功能与作物需求的健康土壤功能的指标体系,为土壤功能健康的诊断指标体系,也为土壤专家主要权衡的指标体系;土壤营养(包括协调性)供给与作物需求的健康营养的指标体系,为土壤营养健康的诊断指标体系,也为土壤管理者主要衡量的指标体系;作物产出(包括产品品质)值与期望值的指标体系,为土壤服务健康的诊断指标体系,也为业主或用户主要考虑的指标体系。相对而言,目

前已有的土壤健康评价指标体系,主要是土壤物理、化学和生物方面的指标,无层次性和应用性,建立的指标是为评价而评价的,评价后无法明确非健康的指标(因子)。本研究提出的评价方法也简单:采用指标当前值除以指标的健康值,以该比值偏离“1”的程度,以及偏离“1”指标的数量多少,来评价健康程度;偏离“1”愈远、偏离“1”的指标愈多,则愈不健康;偏离“1”较大的指标则为不健康的土壤因素;该方法的评价结果可直接指导土壤需要改良或保育的指标。目前土壤健康评价方法,仍然为土壤质量的评价方法,评价方法多而不统一,不同方法评价结果差异明显,评价结果基本上无法应用。

本方法的应用研究还表明:研究区长期以来的耕种和管理模式和技术,一方面使部分土壤向健康状态发展,而另一部分土壤又向退化状态发展,这与国内外关于土壤质量(土壤健康)或其指标的研究结果基本一致:宁夏扬黄灌区土壤质量的演变存在正反两方面的动力过程,整体、长期的发展趋势依然不明^[25];不同类型土壤经过多年耕种利用后,低和高质量的土壤都分别减少^[26];黄土丘陵沟壑区退耕年限增加有利于土壤质量提升^[27];多数研究^[28-30]认为:有机肥与化肥配合施用,对土壤质量提升具有正效应;我国亚热带区土壤质量的时空变化很复杂,没明显规律性^[31-32];长江三角洲地区近20年来土壤肥力总体呈上升趋势^[33];黑土区的土壤有机质呈

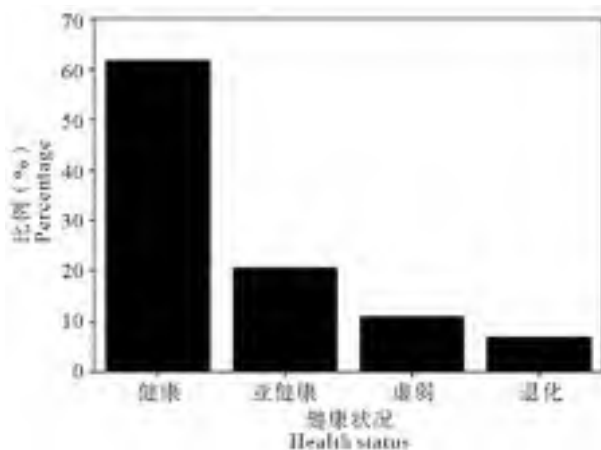


图1 2021年研究区土壤的健康状况

Fig. 1 The overall soil health status of the study area in 2021

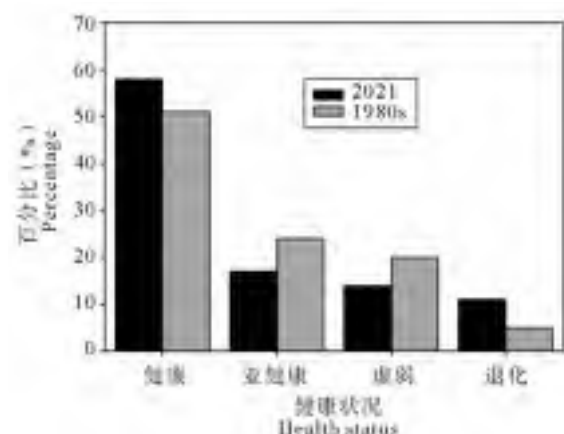


图2 研究区不同时期的土壤健康状况比较

Fig. 2 Comparison of the soil health status of selected indicators in 1980's and 2021

明显减少趋势^[34]。这些都表明:土壤质量(土壤健康)的演变具有复杂性和不确定性。本研究提出的评价方法也表明了这些规律;因此,该方法是可靠的。

另外,值得说明的是:本方法是基于事先确定的健康土壤地块为基础而评价需要评价区域的土壤健康状况。因而,健康地块的正确选择是正确评价的基础,不同区域应有相应的健康地块作为评价的标准;也就是说,不同区域(气候等环境)和不同土壤,应有不同的健康地块标准,这是在应用时需要注意的地方。

5 结论

本研究提出的土壤健康评价的“三套对偶”评价指标体系及评价方法,综合考虑了土壤专家、管理者和生产者三者的权衡指标,有系统性和针对性;采用指标比值法评价健康状况,方法简单。该方法的应用表明:①研究区>80%的土壤为健康状态;②在当前的耕种和管理方式下,该区健康和退化的土壤比例都有增加趋势,说明当前的耕种和管理模式,在针对性和精准性方面还有待完善。

参考文献:

- [1]马静. 油松人工林土壤健康评价及生物调控研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2017.
- [2]周启星. 健康土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3]陶宝先. 苏南丘陵区森林小流域生态系统健康评价[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [4]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.
- [5]杨晓娟, 王海燕, 任丽娜, 等. 我国森林土壤健康评价研究进展[J]. *土壤通报*, 2012, 43(4): 972-978.
- [6]Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z, et al. Soil quality-A critical review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, (120):105-125.
- [7]Nelson K L, Lynch D H, Boiteau G. Assessment of changes in soil health throughout organic potato rotation sequences [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 131: 220-228.
- [8]张敏, 盛丰. 多层次模糊综合评价法在土壤健康评价中的应用[J]. *北方农业学报*, 2017, 45(6): 92-96.
- [9]Igalavithana A D, Lee S S, Niazi N K, et al. Assessment of soil health in urban agriculture: Soil enzymes and microbial properties [J]. *Sustainability*, 2017, 9.
- [10]Pheap S, Lefevre C, Thoumzau A, et al. Multi-functional assessment of soil health under Conservation Agriculture in Cambodia [J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 194.
- [11]Tang X, Li R, Zheng Y, et al. Health assessment of nickel-contaminated soils linked to chemical and biological characteristics [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83: 614-623.
- [12]曹红雨, 高广磊, 丁国栋, 等. 木兰围场典型林分土壤健康评价研究[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(10): 713-718.
- [13]于法展, 张忠启, 陈龙乾, 等. 庐山不同森林植被类型土壤特性及其健康评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(7): 1062-1069.
- [14]蔡小溪, 吴金卓. 森林土壤健康评价研究进展[J]. *森林工程*, 2015, 31(2): 37-41.
- [15]Bi C J, Chen Z L, Wang J, et al. Quantitative assessment of soil health under different planting patterns and soil types [J]. *Pedosphere*, 2013, 23: 194-204.
- [16]Chandel S, Tripathi D, Kakar R. Soil health assessment under protected cultivation of vegetable crops in North West Himalayas[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2017, 38: 97-103.
- [17]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.
- [18]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.
- [19]李焯桢, 骆永明, 侯德义. 土壤健康评估指标、框架及程序研究进展[J/OL]. *土壤学报*: 1-10[2022-04-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20211029.1323.002.html>.
- [20]王怀嵩, 张涛. 农业土壤健康评价体系研究进展[J/OL]. *生态与农村环境学报*: 1-12[2022-04-13]. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0476.
- [21]司绍诚, 吴宇澄, 李远, 等. 耕地和草地土壤健康研究进展与展望[J/OL]. *土壤学报*: 1-19[2022-04-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210811.1141.002.html>.
- [22]任丽娜, 王海燕, 丁国栋, 等. 森林生态系统土壤健康评价研究进展[J]. *世界林业研究*, 2011, 24(5): 1-6.
- [23]刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [24]熊燕, 彭超. 农产品质量检测常见方法分析[J]. *河南农业*, 2017(32): 47-48.
- [25]曲文杰, 杨新国. 干旱半干旱区绿洲土壤质量变化与土壤健康评价研究进展[J]. *北方园艺*, 2014(10): 180-184.
- [26]Wang X J, Gong Z T. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China [J]. *Geoderma*, 1998, 81: 339-355.
- [27]潘成忠, 上官周平, 刘国彬. 黄土丘陵沟壑区退耕草地土壤质量演变[J]. *生态学报*, 2006(3): 690-696.
- [28]Zhang Q, Miao F, Wang Z, et al. Effects of long-term fertilization management practices on soil microbial biomass in China's cropland: A meta-analysis [J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109: 1183-1195.
- [29]Paul Chowdhury S, Babin D, Sandmann M, et al. Effect of long-term organic and mineral fertilization strategies on rhizosphere microbiota assemblage and performance of lettuce [J]. *Environmental Microbiology*, 2019, 21(7): 2426-2439.
- [30]Sadej W, Zolnowski A C. Comparison of the effect of various long-term fertilization systems on the content and fractional composition of humic compounds in Lessive soil [J]. *Plant Soil and Environment*, 2019, 65: 172-180.
- [31]Sun B, Zhou S L, Zhao Q G. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China [J]. *Geoderma*, 2003, 115: 85-99.
- [32]Nie S, Huang S, Zhang S, et al. Effects of long-term located fertilization on soils: A review [J]. *Soils*, 2012, 44: 188-196.
- [33]吴新民, 潘根兴, 李恋卿. 长江三角洲土壤质量演变趋势分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2006(3): 88-91.
- [34]汪景宽, 张旭东, 王铁宇, 等. 黑土土壤质量演变初探II——不同地区黑土中有机质、氮、硫和磷现状及变化规律[J]. *沈阳农业大学学报*, 2002(4): 270-273.

(责任编辑 雷波)