土 壤 学 报
Acta Pedologica Sinica

DOI: 10.11766/trxb202604090174 **CSTR: 32215.14.trxb202604090174**

董元华，师玥，刘云，王辉. 土壤质量与土壤健康概念关系的理论辨析与整合框架[J]. 土壤学报，2026，

DONG Yuanhua, SHI Yue, LIU Yun, WANG Hui. Theoretical Analysis and Integrated Framework of the Conceptual Relationship Between Soil Quality and Soil Health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

土壤质量与土壤健康概念关系的理论辨析与整合框架 *

董元华[1]，师　玥[1,2]，刘　云[1,2]，王　辉[1,2†]

（1. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所)，南京 211135；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要：土壤质量与土壤健康是现代土壤学中的两个重要概念，但长期以来二者常被交叉使用，导致概念边界、指标选择及评价结果解释不够清楚。本文梳理相关概念的演变及代表性定义，并从土壤功能角度比较二者的联系与差异。土壤质量更多反映特定生态系统和利用条件下，由土壤本底及相对稳定属性所决定的功能潜力和用途适宜性；土壤健康则关注土壤作为生命系统，在管理和扰动影响下的实际运行状态，以及维持功能的持续性和韧性。二者在内涵上的交叉，很大程度上源于科学属性描述与应用目标在定义中的混合。为此，本文提出“科学基础定义—应用情境定义”的分层体系，并构建“土壤功能—生态系统服务—管理目标”整合框架，为指标选择、评价结果解释和分类管理提供理论依据。

关键词：土壤质量；土壤健康；概念关系；土壤功能；生态系统服务

中图分类号：S15　　**文献标志码：**A

Theoretical Analysis and Integrated Framework of the Conceptual Relationship Between Soil Quality and Soil Health

DONG Yuanhua[1], SHI Yue[1,2], LIU Yun[1,2], WANG Hui[1,2†]

(1. *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 211135, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Soil quality and soil health are central concepts in soil science and management, but their long-standing overlap can obscure conceptual boundaries, indicator selection, and interpretation of assessments. By reviewing their evolution and representative definitions, this study examines their common foundation and key differences from a soil-function perspective. Soil quality is interpreted primarily as the functional potential and fitness for intended use determined by inherent and relatively stable soil attributes within a given ecosystem and land-use context. However, soil health emphasizes the functional state, persistence, and resilience of soil as a living system under management and disturbance. Their overlap does not reflect two fundamentally different theoretical systems; rather, it largely results from the mixing of scientific descriptions with application-oriented goals. We therefore propose a hierarchical system of fundamental scientific and context-specific definitions and an integrated soil functions-ecosystem

*土壤与农业可持续发展全国重点实验室联合开放基金项目（SKLSSA2504）资助 Supported by the State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (No. SKLSSA2504)

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

作者简介：董元华（1964—），男，湖北建始人，博士，研究员，主要研究领域为土壤生态学、土壤健康。E-mail：yhdong@issas.ac.cn

收稿日期：2026－04－09；收到修改稿日期：2026－08－12；网络首发日期（www.cnki.net）：202 － －

services-management goals framework. This framework treats soil quality and soil health as complementary concepts sharing a common functional basis and provides a clearer basis for indicator selection, assessment interpretation, and context-specific soil management.

Key words: Soil quality; Soil health; Conceptual relationship; Soil function; Ecosystem services

土壤质量（Soil quality）和土壤健康（Soil health）是现代土壤学研究与土壤管理实践中广泛使用的两个概念[1-6]。20 世纪后期，随着土壤评价逐步由农业生产能力拓展到多功能和用途适宜性，土壤质量概念逐渐形成。此后，土壤生物学、生态学及生态系统服务研究不断发展，土壤健康受到越来越多关注，其重点也由单纯评价土壤功能转向关注土壤作为生命系统的运行状态，以及这种状态能否持续支撑多种功能[2-4]。由于二者都以土壤功能为重要基础，在评价指标和实际应用中存在较多交叉。

近年来，土壤健康逐步进入资源管理和政策治理领域，土壤质量与土壤健康在科学研究、政策表述及实际评价中的交叉使用也更加普遍[4,7-9]。现有定义的侧重点并不一致，有些着重描述土壤资源属性和功能潜力，有些更关注生命系统状态、生态过程或具体管理目标。当这些不同层面的内容同时被纳入概念定义时，二者的边界便容易变得模糊。基于这一问题，本文梳理土壤质量与土壤健康的历史演变及代表性定义，从土壤功能视角分析二者差异形成的原因，并进一步提出工作性概念界定和指标解释原则。在此基础上，构建“科学基础定义—应用情境定义”的分层体系以及“土壤功能—生态系统服务—管理目标”整合框架，以期为相关研究和管理实践提供更加清晰的理论依据。

1 土壤质量与土壤健康概念的历史演变

1.1 从土壤肥力到土壤质量：土壤评价视角的拓展

长期以来，土壤肥力（Soil fertility）主要围绕土壤为植物生长供应养分的能力进行评价[10]。进入 20 世纪后期，随着土壤侵蚀、压实、盐渍化、酸化、有机质下降和污染等问题日益受到关注，人们逐渐认识到，土壤的作用并不限于支撑作物生产，还包括水分调节、物质循环、生境维持和环境缓冲等多种功能[11-14]。由此，土壤评价开始突破以生产能力为主的传统框架，逐步转向对多种功能的综合考察。土壤质量概念也在这一过程中形成，其核心是评价特定生态系统和土地利用条件下土壤发挥多种功能的能力[1,15-16]。

1.2 从土壤质量到土壤健康：从功能能力到系统状态

20 世纪 90 年代以来，土壤质量研究逐步从属性描述转向土壤功能及其形成机制[6,17-19]。与此同时，土壤生物学、微生物学和生态学研究揭示了生物过程在功能形成和维持中的重要作用[20-21]，土壤也逐渐被认识为由生物、物理和化学过程共同驱动的复杂生命系统。Doran 和 Zeiss[3]将土壤健康界定为土壤作为生命系统持续发挥功能的能力，推动评价视角由土壤具备何种功能进一步拓展到系统是否处于良好运行状态并能持续发挥功能[2-4,22-24]。

1.3 土壤健康的应用扩展：从学术研究到管理和政策实践

进入 21 世纪，土壤健康的应用已不再局限于学术研究，而是逐渐进入资源管理和政策实践。FAO/ITPS、USDA-NRCS、欧盟以及英格兰 JNCC 等机构，先后将其用于土壤诊断、保护规划、环境监测和生态系统服务评价[4-5,8-9,25-28]。这并不意味着土壤健康取代了土壤质量，而是说明土壤评价的内容在关注生产能力和功能潜力的基础上，又增加了对生命系统运行状态及生态系统服务的考察（图 1）。因此，土壤肥力、土壤质量和土壤健康并不是前后替代的关系，而是在认识不断深入的过程中形成了相互衔接、逐步拓展的概念体系。

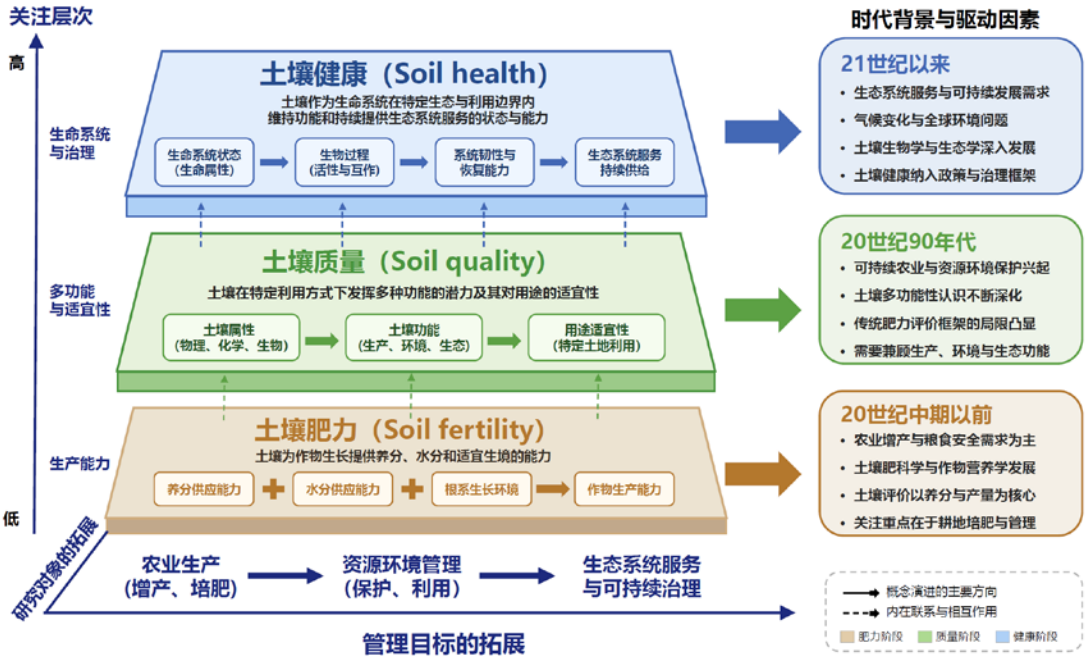

图 1　土壤肥力、土壤质量与土壤健康概念的演进关系示意图

Fig. 1 Schematic of the evolutionary relationship between soil fertility, soil quality, and soil health

2 土壤质量与土壤健康定义差异的形成机制

2.1 共同功能基础与认识侧重

代表性定义虽然各有侧重（表 1），但均未离开土壤功能这一基本出发点[1-5]。Karlen 等[1]所述的土壤质量，是指特定类型土壤在自然或管理生态系统中维持生产、改善环境并支撑人类活动的能力。Doran 和 Zeiss[3]、USDA-NRCS[5]以及 FAO/ITPS[4]在界定土壤健康时，则更多引入了生命系统、持续功能和生态系统服务等内容。由这些定义可以看出，土壤质量较多从土壤资源本身及其利用要求出发，强调土壤具有什么样的功能基础和利用潜力；土壤健康更关心这些功能在现实条件下是否能够正常、持续地发挥，以及土壤受到扰动后能否保持或恢复原有功能[2-4,18,23,29]。

表 1　土壤质量与土壤健康主要定义及核心特征

Table 1 Main definitions of soil quality and soil health and their core characteristics

概念 Concept	来源 Source	科学定义 Scientific definition	主要贡献 Main contribution
土壤质量 Soil quality	Warkentin 和 Fletcher[30]	将土壤质量与不同土地利用目的及相应功能要求联系起来	较早系统提出土壤质量概念，强调评价应服务于土地利用需求
	Larson 和 Pierce[31]	强调土壤在生态系统边界内发挥功能，并关注其与外部环境的良性作用及用途适宜性	突出土壤功能与特定用途之间的关系，为用途适宜性评价提供基础
	Doran 和 Parkin[15]	土壤在生态系统和土地利用边界内发挥功能，以维持生物生产力、环境质量及动植物健康的能力	将生产、环境与生物健康纳入统一的土壤功能评价框架
	Karlen 等[1]	特定类型土壤在自然或管理生态系统边界内维持生产、改善环境并支撑人类健康与居	形成经典学术定义，突出多功能、土壤类型与人类维度

		住的能力	
	曹志洪、周健民[32]	土壤质量是肥力质量、环境质量和健康质量的综合量度	形成中国土壤质量的系统化表述
	Doran 和 Zeiss[3]	作为重要生命系统持续发挥功能的能力	突出土壤作为生命系统及其持续功能
	USDA-NRCS[5]	作为活体生态系统持续支撑植物、动物和人类的能力	面向保护规划与推广实践，传播广泛
	FAO/ITPS[4]	维持陆地生态系统生产力、多样性和环境服务的能力	突出生产力、生物多样性与环境服务
土壤健康 Soil health	Lehmann 等[2]	作为活体生态系统持续发挥功能并支撑植物、动物和人类的能力，并与政策和利益相关者需求衔接	整合生命系统、功能与利益相关者需求
	欧盟[9]	土壤处于能够持续发挥功能并提供生态系统服务的良好物理、化学和生物状态	突出良好状态、生态系统服务与法律监测
	英格兰 JNCC[8]	土壤对生态系统服务交付的贡献能力	面向指标化监测与自然资本评价

注：表中 USDA-NRCS 表述主要指其技术文件和推广体系中广泛采用的土壤健康定义[5]；相关学术整合可参见 Lehmann 等[2]。Note: The USDA-NRCS wording listed in the table refers to the soil health definition widely used in its technical documents and extension system[5]; an academic synthesis is provided by Lehmann et al.[2].

2.2 科学认识与应用需求的共同塑造

定义差异还受到应用情境的塑造。学术定义多强调概念本身和科学内涵[1,3]，国际组织及政策机构则常将其与监测、保护规划和治理目标结合[4-5,8-9,25-28]。随着功能能力、生命系统状态、生态系统服务和治理目标被同时纳入概念表述，土壤质量与土壤健康出现较大交叉，但各自的核心侧重仍然存在。因而，二者的分化可以理解为共同功能基础上科学认识侧重与应用需求共同作用的结果（图 2），而不是两套彼此独立理论体系的产物。

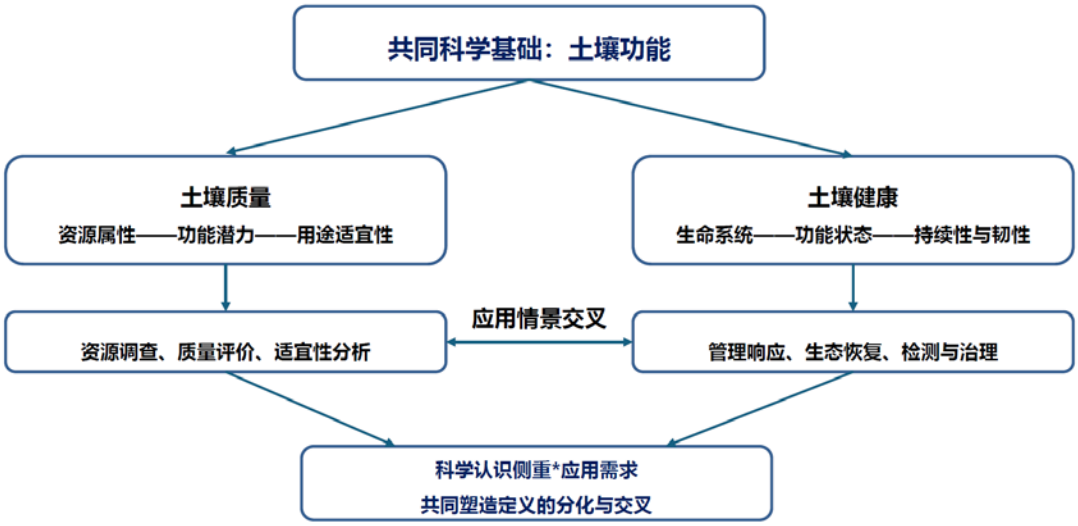

图 2　土壤质量与土壤健康定义差异的形成机制

Fig. 2 Mechanism underlying the differentiation between soil quality and soil health

3 土壤质量与土壤健康的科学内涵、概念界定与指标框架

3.1 共同基础与核心差异

土壤质量和土壤健康都围绕土壤能否持续发挥功能展开，但其评价维度不同。土壤质量主要回答在给定生态系统和利用情境下，土壤“具备什么样的功能能力”，因此强调质地、矿物组成、土层厚度、养分库容等资源属性所决定的功能潜力和用途适宜性[1,11,18,29]。土壤健康则主要回答这些功能“当前是否有效运行并能够持续”，因而更加关注管理条件下的功能状态、生物活性以及生物—物理—化学过程的耦合[2,20-21,33]。

持续性也是二者的共同要求，但含义有所延伸。土壤质量侧重功能能力在较长时期内的保持；土壤健康则进一步强调系统在外界扰动下的抵抗、恢复与适应，即韧性[2,20,33-34]。同时，两类评价都具有情境依赖性：同一土壤在不同土地利用方式和管理目标下所需保障的功能不同，不存在脱离生态系统背景和用途的统一最优标准[1,6,15,29,35]。因此，二者既非相互替代，也非彼此割裂，而是分别从功能潜力和功能状态两个维度对土壤功能进行互补描述。

3.2 工作性界定与评价边界

基于上述文献及差异分析，本文为后续指标解释和整合框架构建作如下工作性界定，而非试图替代已有定义：土壤质量是特定类型土壤在一定生态系统边界和利用情境下履行多种功能的综合潜力，核心在于本底条件和相对稳定属性所赋予的功能承载能力[1,6,11,18,29]；土壤健康是土壤在特定利用和管理条件下维持功能运行并持续提供生态系统服务的状态，重点体现现实功能表现、稳定性及扰动后的恢复能力[2-5,33]。

进一步看，功能潜力与功能状态所反映的并不是同一层面的含义。功能潜力首先受到成土过程形成的本底条件制约[36]，体现土壤在特定情境下可能具备的功能能力[1,11,18]；功能状态则受现实管理和环境条件影响，表现为这些功能在具体情境中的实际发挥程度[2-4,18]。用途适宜性主要回答土壤是否适合某种利用[1,11,29]，而韧性更关注受到扰动后，关键结构和功能能否得到维持或恢复[2,20,33-34]。作出这些区分，目的并不是增加新的概念，而是把不同评价所针对的问题说明得更清楚。一般而言，资源调查、耕地质量评价、土地适宜性分析和功能区划更偏向土壤质量评价；土壤改良、保护性耕作、生态恢复、污染修复以及管理措施实施后的效果判断，则更适合从土壤健康角度加以考察[2,4,20,32-33]。

3.3 指标选择及解释原则

由于二者共享土壤功能基础，指标体系不可能完全分离。土壤质量评价更侧重能够反映本底条件、资源禀赋和长期功能潜力的相对稳定指标；土壤健康评价则更重视对管理和环境变化敏感、能够反映功能运行、生物活性和韧性的动态指标[1-2,6,11,20,29,33,37-38]（表 2）。国内相关研究也逐步将生态系统多功能性、微生物过程及生物调控等内容纳入土壤健康评价与管理[39-41]。

部分指标具有明显的双重属性。土壤有机碳、容重、团聚体稳定性、入渗速率和有效养分既可用于表征资源基础，也可用于判断管理作用下的功能状态[6,18,37,42-43]。因此，指标属于土壤质量还是土壤健康并不完全由指标名称决定，而取决于评价目的、时间尺度、参照基准和解释方式。

实际评价应先明确目标功能和利用情境，再据此筛选最小数据集并确定阈值或基准，而不宜把固定指标清单直接等同于土壤质量或土壤健康。对于盐渍化、污染、侵蚀等特定退化问题，还应增加能够反映主要限制因子及其变化的情境化指标[6,9,13,28,33,37,42,44-45]。

表 2　土壤质量与土壤健康的特征指标及共有指标

Table 2 Characteristic and shared indicators of soil quality and soil health

指标类别 Category	土壤质量特征指标（功能潜力） Soil quality indicators (functional potential)	共有指标（双重属性） Shared indicators (dual attributes)	土壤健康特征指标（功能状态） Soil health indicators (functional state)
物理指标 Physical	土壤质地、有效土层厚度、剖面结构、排水等级、持水能力	容重、团聚体稳定性、有效水分含量、土壤通气状况	穿透阻力、孔隙连通性
化学指标 Chemical	全量养分库容、矿物组成、自然盐分背景、污染物背景值	土壤有机碳、pH、电导率、阳离子交换量、全氮、有效养分、重金属有效态含量	活性碳、潜在可矿化氮
生物指标 Biological	—	微生物生物量碳、土壤呼吸速率、酶活性	硝化与矿化速率、土壤生物多样性、微生物功能多样性、土壤食物网结构、病害抑制能力
综合与过程 Integrated/ process	土壤可蚀性、土地生产力指数、自然生产潜力	入渗速率	土壤有机碳与活性碳变化率、团聚体稳定性恢复率、抗性指数、恢复力指数、韧性指数、养分供应稳定性

注：（1）表中指标为一般性示例，归属依据评价目的与解释框架，并非固定分类。（2）共有指标可同时反映资源基础与运行状态，如土壤有机碳、团聚体稳定性和入渗速率等[6,18,33,37]。（3）实际评价应结合土地利用类型、退化情境和数据可获得性筛选核心指标[6,33,37,42,44-45]。Note: (1) The indicators are illustrative rather than fixed categories, and their assignment depends on the assessment objective and interpretive framework. (2) Shared indicators can reflect both resource condition and functional state, such as soil organic carbon, aggregate stability, and infiltration rate[6, 18, 33, 37]. (3) Core indicators should be selected according to land use, degradation context, and data availability[6, 33, 37, 42, 44-45].

4 土壤质量与土壤健康的分层整合框架

4.1 “科学基础定义—应用情境定义”的分层体系

上述分析说明，土壤质量与土壤健康之所以容易混用，一个重要原因在于共同的科学基础与具体的管理目标常被放在同一层面加以表述。针对这一问题，本文提出“科学基础定义—应用情境定义”的分层体系。科学基础定义着眼于二者共有的内涵，即土壤在特定生态系统和土地利用条件下持续发挥重要功能，并维持系统稳定的能力[1-4]。在此基础上，再结合不同土地利用方式和管理目标作具体解释：土壤质量更多用于判断土壤的功能潜力及其用途适宜性，土壤健康则更关注现实条件下功能发挥的状态、持续性以及受到扰动后的韧性。

这种分层并不是要另行建立两套彼此独立的定义，而是将概念的科学内涵与具体应用要求适当区分。在共同科学基础上，再结合农田、林地、草地、湿地和城市绿地等不同利用情境，对概念作相应解释，从而使其在实际研究和管理中具有较为明确的边界和可操作性（表3）。

表 3　不同应用情境下土壤质量与土壤健康工作定义比较

Table 3 Comparison of working definitions of soil quality and soil health under different application contexts

应用情境 Context	土壤质量 Soil quality	土壤健康 Soil health
农田 Cropland	在特定自然条件和耕作制度下，农田土壤支撑作物生产及相关生态功能的综合潜力	在特定管理条件下，农田土壤持续维持作物生长和生态调节功能的运行状态及其韧性

林地 Forest	在特定立地条件和植被类型下，林地土壤支撑林木生长、水源涵养和森林生态稳定的综合潜力	在植被演替和经营管理条件下，林地土壤持续维持养分循环、水源涵养和生境支持功能的运行状态
草地 Grassland	在特定草地类型和利用方式下，草地土壤支撑植被生长、土壤保持和草地生态功能的综合潜力	在放牧、封育或恢复条件下，草地土壤持续维持植被更新、抗侵蚀和生态服务供给的运行状态
湿地 Wetland	在特定水文和植被条件下，湿地土壤支撑蓄水调节、污染缓冲和碳储存等功能的综合潜力	在水文波动和外界干扰条件下，湿地土壤持续维持净化、碳循环和生境支持功能的运行状态
城市绿地 Urban green space	在特定场地条件和植被配置下，城市公园绿化土壤支撑植物生长、雨水下渗、人体健康维护和景观维持的综合潜力	在养护管理和人为干扰条件下，城市公园绿化土壤持续维持植物生长、渗水通气和生态景观服务的运行状态

注：土壤质量侧重功能潜力与用途适宜性，土壤健康侧重运行状态、持续性与韧性；表中定义为不同应用情境下的工作性表述。Note: Soil quality emphasizes functional potential and fitness for intended use, whereas soil health emphasizes functional state, persistence, and resilience; the definitions shown are context-specific working definitions.

4.2 “土壤功能—生态系统服务—管理目标”框架

在分层定义基础上，进一步以“土壤功能—生态系统服务—管理目标”串联概念、指标与管理（图 3）。土壤功能是科学基础，包括养分循环、水分调节、结构支撑、污染缓冲、生物栖息和碳循环等[4,18,20,46-47]；生态系统服务是这些功能对农业生产、生态维持和社会福祉形成的贡献。Hein 等[48]对生态系统资产与服务流的区分说明，资源基础与服务输出需要在评价中加以区分。管理目标则决定特定情境下优先保障哪些功能和服务[8,25-26,49]。评价时应由管理目标反推需要保障的服务和功能，再选择相应指标并解释结果。

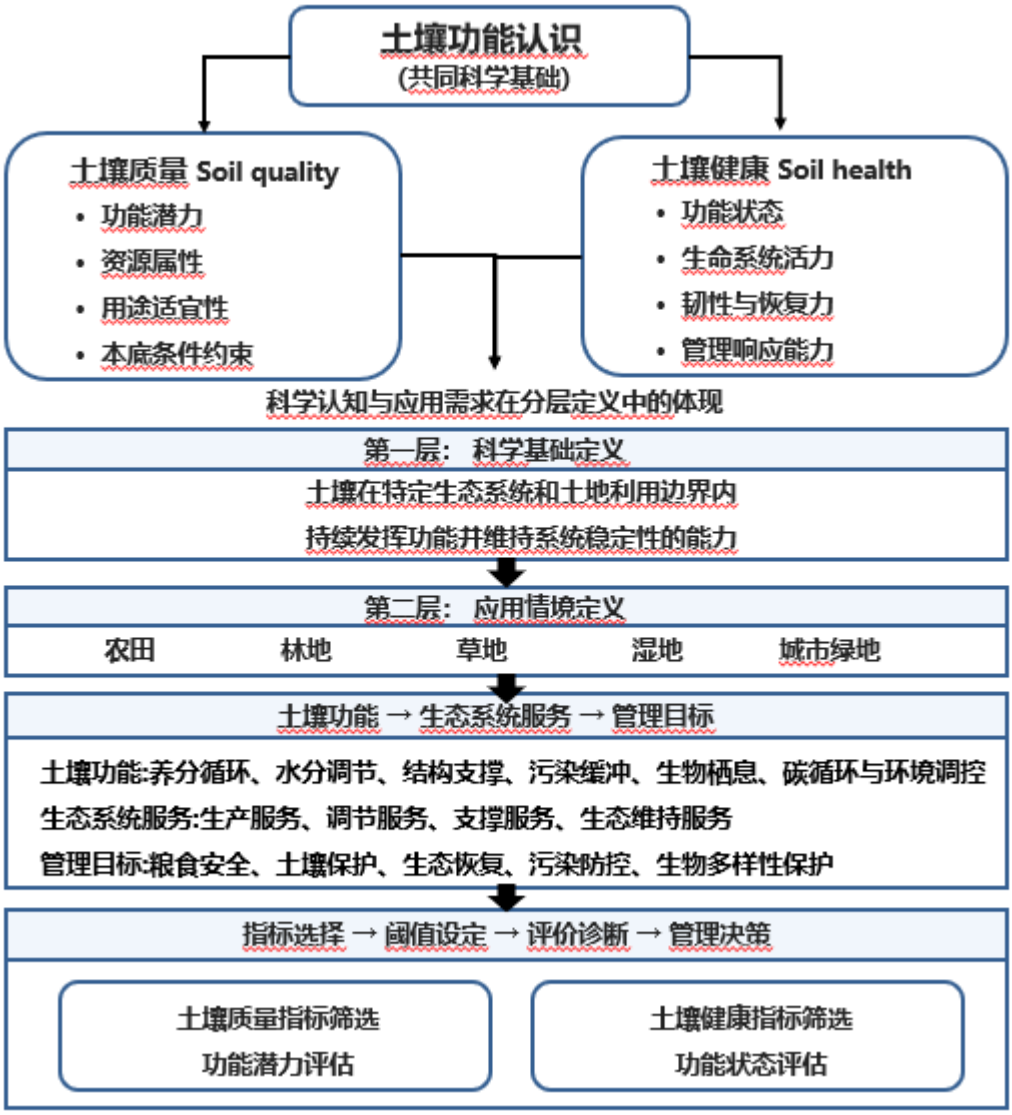

图 3　土壤质量与土壤健康的分层定义及整合框架

Fig. 3 Hierarchical definitions and integrated framework of soil quality and soil health

4.3 应用解释与管理启示

这一框架可以解释同一指标在不同评价中的不同含义。例如，土壤有机碳用于描述长期资源基础时偏向土壤质量，用于判断管理措施后的变化时则可作为土壤健康指标；团聚体稳定性、入渗速率和有效养分也具有类似特征[6,17-18,37,42]。同样，土壤质量较高而土壤健康较低，通常意味着资源基础较好但现实功能受不合理管理或扰动限制；反之，则表明本底条件有限而管理使系统保持了较好的运行状态。

在我国土壤管理中，土壤质量更适合资源调查、耕地质量评价、土地适宜性分析和功能分区，土壤健康则更适合土壤改良、保护性耕作、污染修复和生态恢复等动态管理场景[2,4,32-33,37,50-54]。二者结合，可将资源本底评价与过程管理衔接起来，并根据不同土壤类型、利用方式和治理目标建立差异化基准与管理措施。

5 结论与展望

土壤质量与土壤健康都以土壤功能为基本出发点，但考察的层面有所不同。土壤质量更多着眼于土壤资源本身，关注其功能潜力以及对特定用途的适宜程度；土壤健康则更重视土壤作为生命系统的实际运行状况，包括功能能否持续以及受到扰动后的维持和恢复能力。二者长期存在交叉使用，与其说是源于理论基础上的根本差异，不如说更多是由于科学属性描述与具体应用目标在概念界定中相互交织。

基于这一认识，本文提出“科学基础定义—应用情境定义”的分层体系，并以“土壤功能—生态系统服务—管理目标”为主线构建整合框架，力求在保留共同科学基础的同时，说明二者各自的关注重点及其适用情境。今后的研究还需要针对不同土壤类型和土地利用方式建立具有可比性的基准与阈值，进一步认识土壤动态变化、韧性与生态系统服务之间的联系，并加强概念界定、指标选择与实际管理需求之间的衔接。

参考文献（References）

[1] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 4-10.

[2] Lehmann J, Bossio D A, Kögel-Knabner I, et al. The concept and future prospects of soil health[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(10): 544-553.

[3] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(1): 3-11.

[4] FAO, ITPS. Towards a definition of soil health[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.

[5] USDA-NRCS. Soil health technical note No. 470-16: Soil health testing to support conservation planning[R]. Washington, DC: USDA Natural Resources Conservation Service, 2025.

[6] Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality–A critical review[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2018, 120: 105-125.

[7] Cahyana D, Karolinoerita V, Manurung E D, et al. Bridging the conceptual gap between soil quality and soil health for one health[J]. Soil Security, 2026, 22: 100219.

[8] Gordy A, Wood E, Breavington J, et al. Environmental indicator e7: Healthy soils–technical documentation for a soil health indicator for England’s environmental improvement plan[R]. Peterborough: JNCC, 2026.

[9] European Parliament and Council of the European Union. Directive (EU) 2025/2360 of 12 November 2025 on soil monitoring and resilience (soil monitoring law)[EB/OL]. Official Journal of the European Union, 2025-11-26[2026-04-01]. http://data.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj.

[10] Feller C, Blanchart E, Bernoux M, et al. Soil fertility concepts over the past two centuries: The importance attributed to soil organic matter in developed and developing countries[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2012, 58(sup1): S3-S21.

[11] Karlen D L, Ditzler C A, Andrews S S. Soil quality: Why and how?[J]. Geoderma, 2003, 114(3-4): 145-156.

[12] Pierce F J, Larson W E, Dowdy R H, et al. Productivity of soils: Assessing long-term changes due to erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38(1): 39-44.

[13] FAO, UNEP. Global assessment of soil pollution[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021.

[14] FAO, ITPS. Status of the world’s soil resources: Main report[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015.

[15] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality[M]//Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1994: 3-21.

[16] Warkentin B P. The changing concept of soil quality[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50(3): 226-228.

[17] Doran J W, Jones A J. Methods for assessing soil quality[M]. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1996.

[18] 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.

[19] Bonfante A, Basile A, Bouma J. Targeting the soil quality and soil health concepts when aiming for the United Nations sustainable development goals and the EU green deal[J]. Soil, 2020, 6(2): 453-466.

[20] Creamer R E, Barel J M, Bongiorno G, et al. The life of soils: Integrating the who and how of multifunctionality[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2022, 166: 108561.

[21] FAO, ITPS, GSBI, et al. State of knowledge of soil biodiversity: Status, challenges and potentialities[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.

[22] Lal R. Soil health and carbon management[J]. Food and Energy Security, 2016, 5(4): 212-222.

[23] Harris J A, Evans D L, Mooney S J. A new theory for soil health[J]. European Journal of Soil Science, 2022, 73(4): e13292.

[24] Mponela P, Chimonyo V G P, Chiduwa M, et al. Soil-health frameworks in agri-food systems. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2026, 46: 34.

[25] European Commission. EU Soil Strategy for 2030: Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate[R]. Brussels: European Commission, 2021.

[26] Harris M, Deeks L, Hannam J, et al. Towards indicators of soil health[R]. Peterborough: JNCC, 2023.

[27] European Commission. Caring for soil is caring for life: Ensure 75% of soils are healthy by 2030 for food, people, nature and climate[R]. Brussels: European Commission, 2020.

[28] European Environment Agency. Soil monitoring in Europe: Indicators and thresholds for soil health assessments[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023.

[29] Wander M M, Drinkwater L E. Fostering soil stewardship through soil quality assessment[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(1): 61-73.

[30] Warkentin B P, Fletcher H F. Soil quality for intensive agriculture[C]//Proceedings of the international seminar on soil environment and fertilizer management in intensive agriculture. Tokyo: Society of the Science of Soil and Manure, 1977: 594-598.

[31] Larson W E, Pierce F J. Conservation and enhancement of soil quality[C]//Dumanski J, Pushparajah E, Latham M, et al. Evaluation for sustainable land management in the developing world. Bangkok: International Board for Soil Research and Management, 1991: 175-203.

[32] 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.]

[33] Bhaduri D, Sihi D, Bhowmik A, et al. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 938481.

[34] Seybold C A, Herrick J E, Brejda J J. Soil resilience: A fundamental component of soil quality[J]. Soil Science, 1999, 164(4): 224-234.

[35] Obade V P, Lal R. Towards a standard technique for soil quality assessment[J]. Geoderma, 2016, 265: 96-102.

[36] Jenny H. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology[M]. New York: McGraw-Hill, 1941.

[37] Moebius-Clune B N, Moebius-Clune D J, Gugino B K, et al. Comprehensive assessment of soil health—The cornell framework[M]. Geneva, NY: Cornell University, 2016.

[38] Schloter M, Dilly O, Munch J C. Indicators for evaluating soil quality[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 98(1-3): 255-262.

[39] Yang Y, Guo Z Y, Pan K, et al. Farmland soil health assessment based on ecosystem multi-functionality[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 461-475. [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]. 土壤学报, 2022, 59(2): 461-475.]

[40] Kong Y L, Qin H, Zhu C Q, et al. Research progress on the mechanism by which soil microorganisms affect soil health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 331-347. [孔亚丽, 秦华, 朱春权, 等. 土壤微生物影响土壤健康的作用机制研究进展[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 331-347.]

[41] Fang L C, Hu Z Y, Cui Q L, et al. Construction and application of synthetic communities: A new strategy to improve soil

health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(5): 1233-1245. [方临川, 胡紫莹, 崔庆亮, 等. 合成菌群构建与应用: 提升土壤健康新策略[J]. 土壤学报, 2025, 62(5): 1233-1245.]

[42] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6): 1945-1962.

[43] Karlen D L, Stott D E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality[M]// Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1994: 53-72.

[44] Askari M S, Holden N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management[J]. Geoderma, 2014, 230-231: 131-142.

[45] Arshad M A, Martin S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 88(2): 153-160.

[46] Lechevallier H, Lagacherie P, Wadoux A M J. A conceptual framework for soil function evaluation: Towards a common base[J]. Geoderma, 2025, 461: 117476.

[47] Wubs E R J. Benchmarking soil multifunctionality[J]. Soil, 2025, 11(2): 609-628.

[48] Hein L, Bagstad K, Edens B, et al. Defining ecosystem assets for natural capital accounting[J]. PLoS One, 2016, 11(11): e0164460.

[49] Schwilch G, Bernet L, Fleskens L, et al. Operationalizing ecosystem services for the mitigation of soil threats: A proposed framework[J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 586-597.

[50] 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.]

[51] Zhang J Z, Li Y Z, Li Y, et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 603-616. [张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 603-616.]

[52] Li X Z, Luo Y M, Hou D Y. The indicators, framework and procedures for soil health: A critical review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 617-625. [李烜桢, 骆永明, 侯德义. 土壤健康评估指标、框架及程序研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 617-625.]

[53] Si S C, Wu Y C, Li Y, et al. The current research progress and prospects of cultivated and grassland soil health—A review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 626-641. [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]. 土壤学报, 2022, 59(3): 626-641.]

[54] Wu K N, Yang Q J, Zhao R. A discussion on soil health assessment of arable land in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 537-544. [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.]

（**责任编辑：**卢 萍）