草地土壤健康评价方法及研究进展

夏　菲[1],冯颜淞[2],丁佳瑞[2],石　昊[2],吴皓阳[2],严　双[2]

(1.西藏自治区农牧科学院草业科学研究所,西藏 拉萨 850000;2.西华师范大学生态研究院,四川 南充 637009)

摘　要:系统阐述了土壤健康概念的演进脉络:从早期侧重于生物功能与生产力的单一认知,逐步发展为强调土壤作为动态生命系统兼具生产力维持、环境调节与生态服务供给的综合性理念。在此基础上,重点综述了草地土壤健康评价中指标体系的构建原则与筛选方法,分析了主成分分析、最小数据集等统计方法在识别关键敏感性指标中的应用,并比较了不同草地类型下物理、化学、生物指标的适配性。评价方法方面,梳理了从早期定性评价到现代多指标定量集成的技术发展路径,介绍了土壤管理评估框架、康奈尔土壤健康评价系统等国际主流模型,以及基于"木桶结构"和生态系统服务功能的本土化探索。

关键词:草地土壤健康;评价指标体系;指标筛选;评价方法

中图分类号:S812.2　　**文献标识码**:C

Research progress on evaluation methods of grassland soil health

Xia Fei[1], Feng Yansong[2], Ding Jiarui[2], Shi Hao[2], Wu Haoyang[2], Yan Shuang[2]

(1. Institute of Pratacultural Science, Xizang Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa Xizang 850000, China; 2. College of Ecology, West China Normal University, Nanchong Sichuan 637000, China)

Abstract: This paper reviews the evolutionary connotation of soil health theory, which has shifted from single focus on biological productivity to a comprehensive concept that regards soil as a dynamic living system balancing production maintenance, environmental regulation and ecological service supply. It summarizes the construction principles and screening methods of evaluation indicator systems for grassland soil health, and introduces applications of principal component analysis and minimum data set in screening sensitive indicators, comparing the adaptability of physical, chemical and biological indices for various grassland types. This paper also reviews the evolution of evaluation systems from qualitative judgment to multi-index quantitative models, introduces mainstream international frameworks including soil management assessment framework and Cornell soil health system, and summarizes localized evaluation models based on barrel effect and ecosystem service theory. Prospects on unified national assessment system construction are put forward, supporting precise grassland management and carbon neutrality goals.

Key words: grassland soil health; evaluation index system; index screening; evaluation method

草地生态系统覆盖了地球陆地表面积的40%,在提供动物产品(贡献率超过50%)和固存陆地碳(占比超过三分之一)方面发挥着不可替代的作用[1]。我国是全球草地资源最为丰富的国家,根据第三次国土土地调查,我国草地面积达26 453.01万hm^2,约占国土总面积的27.5%。然而,草地对土地利用变化及气候变化极为敏感,过度放牧、气候变暖与降水减少等因素导致全球近半草地出现不同程度退化[2]。我国草地退化问题尤为严峻,90%以上的草地存在不同程度的退化现象[3]。自1999年起,我国陆续实施退耕还林(草)等生态工程,并在人工草地建设、天然草地改良和草畜平衡技术等方面投入大量资源,然而,这些措施是否显著提升了草地生产力、是否从根本上遏制了生态退化趋势,目前尚缺乏明确结论。土壤健康作为草地生态系统健

收稿日期:2025-12-01

基金项目:西藏自治区重点研发计划项目(XZ202201ZY0005N)。

作者简介:夏菲(1987—),女,硕士,副研究员,主要从事高寒草地资源开发与利用研究,E-mail:feifei03211221@126.com。

康的核心基础，不仅关系到农牧产品质量安全，也是牧区可持续发展的关键前提。基于国内外相关理论与方法的系统梳理，本文旨在构建适用于草地生态系统的土壤健康状况评价体系，以及退化程度与退化速率的评估技术框架，从而为草地保护修复、生态治理提供科学支撑，助力生态文明与美丽中国建设，并为建立符合我国国情的草地土壤健康评价体系奠定理论和方法基础。

1 土壤健康及草地土壤健康的概念

1.1 土壤健康的概念

土壤健康的概念演进呈现出从单一功能到综合生态系统服务的显著特征。其内涵最早可溯至 1936 年美国农业部农业调整署出版的“Soil Health and National Wealth”，该文献明确指出土壤健康不仅关乎肥力与营养供应，还必须保障土壤生物的功能性作用。随后，Doran and Zeiss[4] 提出了一个被广泛接受的定义，强调土壤是“在生态系统和土地使用范围内作为重要生命系统发挥作用的能力”，能够维持动植物生产力，并改善水与空气质量，该定义深刻体现了土壤的多功能性及其作为生态系统基石的适应性。

在国际层面，联合国粮农组织（FAO）将其定义为“土壤对陆地生态系统生产力、生物多样性和环境的持续保持能力”；美国农业部自然资源保护局（USDA-NRCS）则界定为“土壤作为维持植物、动物和人类生存的重要生命生态系统持续发挥作用的能力”。在学者研究方面，Lehmann 等[5] 指出该概念应成为连接土壤科学、政策与可持续发展的桥梁；Jazen 等[6] 进一步补充其为“土壤维持其所在生态系统的社会生态功能的活力”，拓展了其在支撑更广泛社会活动方面的价值；为应对全球挑战，范畴更广的“土壤安全”概念被提出[7-8]，Lehmann 等[5] 明确指出，在与可持续发展目标的关联上，土壤健康的范围介于土壤质量与土壤安全之间，并远广于聚焦养分的土壤肥力。

在我国，章家恩[9] 将其定义为在维持生态系统生产力与动植物健康的同时，不发生土壤退化及其他生态环境问题的能力；庞学勇等[10] 从管理视角强调其核心是实现土壤长期可持续利用并最大限度降低环境负面影响；陶宝先等[11] 指出健康土壤应具备良好结构、正常功能，并能提供可持续生产资料；董元华等[12] 则提出了一个包含物理、化学、生物、环境及生态系统健康 5 个层级的框架。这些探索最终体现在国家政策中，国家标准《耕地质量等级》（GB/T 33469－2016）将其明确定义为“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”[13]。

综上所述，土壤健康的概念经历了从关注生物功能到强调其作为生命系统的综合生态服务能力，再发展到与政策、社会福祉及全球目标紧密衔接的演进过程，通过与其他相关概念的比较，其独特而承上启下的内涵与应用范围得以明确。

1.2 草地土壤健康的概念

根据土壤健康的核心概念，草地土壤健康可被理解为草地生态系统中土壤作为动态生命系统维持其多功能性与服务能力的持续状态。早在 1949 年，Dyksterhuis[14] 提出“草地基况”概念，用以表征草地在正常气候与优化管理下的健康与生产力状况，已隐含对土壤功能的关注。更早时期，Sampson（1919）已将土壤有机质作为评价草地健康的关键指标，强调土壤作为植被生长与养分循环的基础地位。

尽管目前学界尚未就草地土壤健康的明确定义形成共识，但普遍认同其核心在于土壤在不同生态系统背景下所能发挥的关键功能与所提供服务的均衡性。草地土壤健康的具体表现及其服务内容，高度依赖于所处生态系统的类型与人类对其生态价值的判断[6]。在此理论基础上，张桐瑞等[15] 类比耕地土壤健康的内涵，结合草地特有的生态服务功能，将草地土壤健康定义为：“草地生态系统中土壤维持其支持、调节、供给和文化服务均衡发展的能力，具体涵盖物质循环、气候调节、生物多样性维持及动植物生产等多维功能”。该定义从生态系统服务视角整合了土壤的多种功能，进一步明确了草地土壤健康的核心在于其综合服务能力的可持续发挥。

2 草地土壤健康的评价方法

2.1 草地土壤健康评价指标

土壤健康评价指标的选择和各项指标权重的确定，因土地利用类型的不同而存在显著差异[16]。当前的草地土壤健康的研究多集中于气候变化、管理措施等对土壤健康影响的土壤因子。根据土壤健康文献统计，最常提出的土壤质量指标是总有机质（碳）和土壤 pH 值，其次是总

氮、有效磷、有效钾、土壤容重[17]。在草地土壤健康研究中，使用最多的土壤物理指标有土壤容重和质地的相关指标(孔隙度、团聚体)，土壤重金属、微量元素等指标使用较少。司绍诚等[16]根据土壤主要的生态服务功能提出了一套草地土壤健康评价指标体系并对其指标体系中各项指标对应的土壤功能进行了解释。该草地土壤健康评价指标体系主要通过4个物理指标(容重、孔隙度、田间持水量和团聚体稳定性)、10个化学指标(有机质(碳)、全氮、全磷、全钾、有效氮、有效磷、有效钾、阳离子交换量、pH值和可溶性碳、氮)和5个生物指标(微生物量碳和氮、表层土壤微生物多样性、土壤呼吸、蚯蚓丰度、土壤酶活性)对土壤功能进行了解释。王丽通过对我国宁夏不同放牧程度的荒漠草原土壤进行了土壤健康评价，所选用的指标有容重、孔隙度、细菌、脱氢酶、速效钾等。与耕地生态系统相比，草地生态系统不仅具有生物多样性维持、野生动植物栖息地等服务功能，而且动植物也在生态系统中有着重要地位[17]。Ghimire等通过土壤有机碳、总氮、可矿化碳、可矿化氮、微生物群落等指标对半干旱地区草地在恢复过程中的土壤健康状况作出评价。张桐瑞等[15]将植物地上、地下生物量及植物和土壤动物多样性等指标加入，以期完善对草地土壤功能的表征。

国内外学者目前尚未对选择哪些土壤特征指标来进行土壤健康评价达成一致意见，相比于耕地土壤健康，草地土壤健康的研究较少，而且由于草地土壤健康研究中针对的不同研究目的，选取土壤指标及构建指标体系的方法繁多。张桐瑞等[15]总结了27篇草地土壤健康研究中使用的土壤指标并对其分类汇总，尽管土壤生物学指标在土壤健康中的作用越来越受到重视，但很多土壤健康评价中生物学指标仍被忽视，主要原因是土壤生物指标过于多变、短暂且无规律，无法充分反映土壤健康和功能，从而限制了它们在评估土壤健康方面的有效性。近年来，随着科技进步和研究水平的进一步提高，现代化技术也大量引入草地土壤健康评价中，如卫星遥感、无人机空天观测等，评价范围也从小尺度向大尺度、大区域进行扩展，尤其进入大数据时代后，草地土壤健康评价由单指标或几个指标向多指标发展，通过构建草地“星－空－地－土”立体监测体系，有效地提高了草地土壤健康评价的精度和时效性。

2.2 草地土壤健康的评价方法

草地健康评价的早期研究主要集中于20世纪初至中期，这一阶段的研究特征是以单一指标为核心，侧重于对草地基况的定性评价。1919年，Sampson开创性地提出了以土壤有机质作为评价草地健康状况的指标，通过土壤这一基础生态组分来反映草地的整体状况，为后续研究奠定了重要基础。随着研究的深入，学者们开始关注草地植被特征与草地健康的关系。1949年，Dykterhuis[14]构建了以植物群落为一级指标、盖度和组成为二级指标的评价体系，将草地基况划分为“优良、良好、中等、低劣”4个等级，实现了从单纯土壤指标向植被复合指标的拓展。1958年，R.R.Humphrey则从草地利用角度出发，采用可利用产量占总产量的百分比来评价草地基况，这一指标更加贴近草地生产管理的实际需求，这一阶段的单一指标评价方法虽然简单易行，但存在着明显的局限性。首先，单一指标难以全面反映草地生态系统的复杂性和多功能性；其次，定性评价缺乏精确的量化标准，降低了评价结果的客观性和可比性；最后，这些方法大多忽视了草地生态系统的动态演变过程和不同区域的环境差异。然而，这些开创性工作为后续研究提供了重要基础，推动了草地健康评价向更加综合、全面的方向发展。

现代土壤健康评价方法呈现出系统化、标准化特征，发达国家已建立多个成熟评价体系，如加拿大国家土壤健康监测计划、美国土壤管理评估框架(SMAF)与康奈尔土壤健康评价系统(CASH)，以及欧盟LANDMARK项目的Soil Navigator DSS决策模型。这些体系通过孔隙密度、团聚体稳定性、微生物呼吸等物理、化学、生物指标实现土壤健康量化。在指标筛选方法上，主成分分析法和最小数据集法被广泛应用，研究均表明土壤健康随草地退化程度和植被覆盖度降低而下降。值得注意的是，不同修复措施效果评价存在差异：Zhou等发现土壤健康呈封育＞水平沟＞放牧＞鱼鳞坑的趋势；Ghimire等通过微生物群落等指标评估恢复过程；而张光茹等与Dong等关于人工建植效果的研究结果相左，反映出指标选择和方法差异对评价结果的影响。

我国虽未建立国家尺度草地土壤健康评价体系，但已取得显著进展，研究团队围绕土壤健康敏感因子、评价体系等开展系统研究。在评价方法创新方面，吴克宁等通过“木桶结构”理论阐明了草地与其他土地利用类型的功能权重差异；Zwetsloot 等基于 5 类土壤功能（初级生产力、水调节净化、气候调节、生物多样性、养分循环）构建了跨国评价框架；Van Leeuwen 等开发的决策专家模型（DEX）证实 pH 和有机碳是土壤生物多样性功能的核心属性。当前研究热点集中于 3 个方面：1）草地管理模式（特别是放牧强度、频度与方式）对土壤健康的影响，王丽[17]研究发现容重、脱氢酶等指标对荒漠草原放牧响应敏感；2）退化修复措施效果评价，封育被证实能有效提升土壤质量；3）草原生态系统服务功能与土壤健康的耦合关系。未来研究应注重整合土壤物理-化学-生物指标，建立基于生态系统服务功能的评价权重体系，发展多尺度、标准化的草地土壤健康评价方法，为草地生态系统可持续管理提供支撑。

3 草地土壤健康评价研究进展

目前，我国草地土壤健康评价体系存在明显短板。在国家层面，尚未建立专门针对草地生态系统的健康评价体系，现有研究多直接套用以耕地为对象的评价方法，忽视了草地在碳汇、生物多样性维持等方面的独特功能。在技术层面，各地采用的指标筛选方法和评分标准不一，导致研究成果呈现“碎片化”，区域间缺乏可比性。同时，草地土壤健康监测未能纳入国家生态监测网络，缺乏长期定位观测数据支撑，使得现有评价难以有效服务于国家层面的草原生态保护决策与政策评估。

面向未来，我国应尽快构建国家尺度的草地土壤健康评价体系。建议制定全国统一的技术指南，建立涵盖物理、化学、生物指标的标准化框架，并区分不同草原类型区的评价标准。技术上应重点突破草地土壤的多功能性评价，融合遥感与地面监测构建智能监测网络，开发自主知识产权的诊断模型。政策上需将土壤健康评价深度融入生态补偿机制与国土空间规划，推动跨部门数据共享与业务协同，通过“产学研用”融合推动研究成果向标准规范转化，从而为草原生态保护修复与碳中和战略提供精准支撑。

参考文献：

[1] Hartley I P, Hill T C, Chadburn S E, et al. Temperature effects on carbon storage are controlled by soil stabilization capacities [J]. Nature Communications, 2021, 12: 6713.

[2] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, et al. Combatting global grassland degradation [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(10): 720-735.

[3] 王得伟，尤泳，张学宁，等. 退化草地改良工艺与装备发展综述 [J]. 农业工程学报，2024，40(7)：17-33.

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

[6] Janzen H H, Janzen D W, Gregorich E G. The ‘soil health’ metaphor: illuminating or illusory [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 159: 108167.

[7] Koch A, McBratney A, Lal R. Global soil week: put soil security on the global agenda [J]. Nature, 2012, 492(7428): 186.

[8] Zhu Y G, Meharg A A. Protecting global soil resources for ecosystem services [J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2015, 1(3): 1-4.

[9] 章家恩. 土壤生态健康与食物安全 [J]. 云南地理环境研究，2004，16(4)：1-4.

[10] 庞学勇，刘庆，刘世全，等. 川西亚高山云杉人工林土壤质量性状演变 [J]. 生态学报，2004，24(2)：261-267.

[11] 陶宝先，张金池，林杰，等. 苏南丘陵不同林分类型土壤质量评价 [J]. 南京林业大学学报（自然科学版），2009，33，(6)：74-78.

[12] 董元华，陈能场，李建刚. 土壤矿质元素与健康效应 [M]//陈怀满. 环境土壤学. 3 版. 北京：科学出版社，2018：392-398.

[13] GB/T 33469—2016 耕地质量等级 [S].

[14] Dyksterhuis E J. Condition and management of range based on quantitaibe ecology [J]. Journal of Range Management, 1949, 2(3): 104.

[15] 张桐瑞，金轲，王珍，等. 草地土壤健康的内涵及其评价 [J]. 中国草地学报，2022，44(5)：102-113.

[16] 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)：625-642.

[17] 王丽. 不同轮牧方式下宁夏荒漠草原土壤生物学性状变化及土壤健康评价 [D]. 银川：宁夏大学，2015.