

DOI: 10.11766/trxb202507010320

CSTR: 32215.14.trxb202507010320

吴克宁, 陈星宇, 陈安琪, 冯喆. 中国土壤恢复力评价[J]. 土壤学报, 2026, 63 (5): 1449–1461.

WU Kening, CHEN Xingyu, CHEN Anqi, FENG Zhe. Assessment of Soil Resilience in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (5): 1449–1461.

中国土壤恢复力评价*

吴克宁^{1, 2}, 陈星宇^{1, 3}, 陈安琪¹, 冯 喆^{1, 2}

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部国土整治重点实验室, 北京 100035; 3. 中共鄂尔多斯市委员会办公室综合保障中心, 内蒙古鄂尔多斯 017000)

摘 要: 土壤恢复力是指土壤在受到外界扰动后恢复其原有性质和功能的能力, 是实现土壤资源可持续利用的重要生态指标。本文旨在构建适用于大尺度的土壤恢复力评价体系, 并评估我国土壤恢复力的空间分布特征。研究基于现有研究成果, 提炼指标构建逻辑, 确定土壤性质、气候因素、地形因素、生物特性四个维度, 共设定 9 项具体指标, 采用层次分析法确定指标权重, 并进行加权叠加分析, 形成全国土壤恢复力空间分布图。结果表明, 我国土壤恢复力呈现出由西向东、由北向南逐渐增强的空间格局。全国范围内, 高与较高恢复力土壤分别占 25% 和 39%, 主要集中于华南和西南地区; 恢复力相对较低的区域包括甘新区和黄土高原区。研究为建立我国宏观尺度的土壤特定功能评价在理论方法层面提供了技术支撑与决策依据。

关键词: 土壤恢复力; 土地评价; 替代指标法; 中国

中图分类号: S158.2 **文献标志码:** A

Assessment of Soil Resilience in China

WU Kening^{1, 2}, CHEN Xingyu^{1, 3}, CHEN Anqi¹, FENG Zhe^{1, 2}

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Land Remediation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China; 3. The Comprehensive Support Center of the Office of the CPC Ordos Municipal Committee, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: 【Objective】 Soil resilience refers to the ability of soil to restore its original properties and functions after being disturbed by anthropogenic or climate change. It is an important ecological indicator for achieving the sustainable utilization of soil resources. This paper aims to construct a soil resilience evaluation system suitable for large-scale applications and assess the spatial distribution characteristics of soil resilience in China. **【Method】** Based on existing research results, this study refines the logic of index construction, determines four dimensions: soil properties, climatic factors, topographic influences, and biological characteristics, and sets a total of nine specific indicators. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is used to determine the weights of the indicators, and weighted superposition analysis is conducted to form a national spatial distribution map of soil resilience. **【Result】** The results show that soil resilience in China presents a spatial pattern that gradually increases from West to East and from North to South. Nationwide, soils with high and relatively high resilience account for 25% and 39%, respectively, mainly concentrated in South and Southwest China. The areas with relatively low resilience include the Gansu and Xinjiang regions

* 国家自然科学基金项目(42430705)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42430705)

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

收稿日期: 2025-07-01; 收到修改稿日期: 2026-01-04; 网络首发日期(www.cnki.net): 2026-04-07

and the Loess Plateau Area. 【 Conclusion 】The research provides technical support and decision-making basis for establishing the evaluation of specific soil functions at the macroscopic scale in China at the theoretical and methodological level.

Key words: Soil resilience; Land evaluation; Proxy indicator method; China

土壤作为不可再生资源,其生态功能在受到外界扰动后往往会表现出不同程度的退化。然而,土壤自身具有一定的恢复能力,即土壤恢复力,这种恢复力对于保障粮食安全、改善生态环境以及实现土地资源可持续利用具有至关重要的作用^[1-3]。当前,我国面临耕地数量不足^[4]、土地利用不合理^[5-6]及土壤污染严重^[7-8]等现实问题,明确并加强土壤恢复力研究,可以有效缓解土壤退化,提升土壤生态功能,有助于制定科学的土地管理政策,从而实现生态保护与经济协调发展的协调统一。

自 20 世纪 70 年代以来,土壤恢复力的概念逐步进入生态与土壤科学领域,并引起广泛关注。Holling^[9]最早定义恢复力为系统吸收变化并恢复平衡状态的能力;随后,Pimm^[10]进一步明确了土壤恢复力概念,将其定义为土壤从扰动中恢复的能力。近年来,国内外研究人员通过实验法和替代指标法对土壤恢复力进行了多维度的评价研究。实验法通过人工施加扰动并观测恢复状况来评估土壤恢复力,但存在尺度较小、成本高、实验环境受限等不足^[11-12]。而替代指标法则通过选取土壤理化性质、生物特性等可测量指标间接评估土壤恢复力,已被广泛应用于较大尺度研究中^[13-14]。然而,该方法存在指标选择不明确、科学性与可行性难以兼顾等问题。因此,构建一套科学、系统的大尺度土壤恢复力评价指标体系已成为当前研究的热点与难点。在我国宏观尺度土地评价中,虽然以往开展了多项相关实践研究,如耕地质量综合评价^[15-16]、耕地质量动态变化与预警^[17],但大多围绕土壤生产能力和理化性质展开,未专门针对土壤特定功能或属性进行系统评价。此外,国内不同学者表达、引用的恢复力概念内涵不尽相同,造成了其含义的多样性和概念的模糊性^[18-20],与恢复力有关的抵抗力、稳定性也存在类似的现象,且抵抗力和恢复力有时被混淆使用^[21]。

鉴于此,本研究在明确土壤恢复力概念内涵的基础上,从土壤性质、气候因素、地形影响、生物特性四个维度建立了适用于大尺度的土壤恢复力评

价指标体系,采用层次分析法确定指标权重,以期弥补现有大尺度土壤功能评价理论的不足。

本研究旨在解决以下关键问题:(1)明确土壤恢复力的概念内涵,并与土壤质量、缓冲、净化等相关概念做出明确区分;(2)建立大尺度下土壤恢复力替代指标体系,明确评价指标的选择、分级及权重确定方法;(3)通过 ArcGIS 空间分析,完成全国土壤恢复力评价并探明其空间分异特征;(4)以省域粮食产量波动数据为基础,验证评价结果的科学性和实用性。本研究的开展将为土地资源的可持续管理提供重要理论基础和现实指导,有助于解决土壤退化问题,提高我国土壤资源保护和利用水平。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

我国位于北半球、亚洲东部和太平洋西岸,地理范围大致处于 4°15'-53°31'N、73°-135°E 之间,南北跨度约 5 500 km,东西跨度约 5 200 km,陆地总面积约 960 万 km²,具备复杂多样的自然环境条件,区域差异明显,土地利用方式多样。从气候上看,我国横跨热带、亚热带、温带及高原寒带,气候类型包括东部的季风气候、西北部的温带大陆性气候和青藏高原的高寒气候,年降水量从东南沿海的 2 000 mm 以上递减至西北内陆不足 100 mm,温度从南方的年均 20℃ 以上递减至北方和高原地区的 0℃ 以下。这种多样的气候背景深刻影响了土壤的形成与演替过程。

在地貌格局上,我国地势西高东低,自西向东呈三级阶梯分布。青藏高原、黄土高原、内蒙古高原等复杂地貌单元与冲积平原、盆地交错分布,土壤形成过程在不同地形单元中表现出明显差异。例如,黄土高原地区多为风积物母质,结构疏松,易发生侵蚀,恢复力相对较弱;而江南丘陵及华南平原区水热条件优越,土壤发育程度高,具有较强的恢复能力。根据全国土壤普查办公室编制的《1:100 万中华人民共和国土壤图》,我国共有 12 个土纲、

61 个土类和 227 个亚类, 土壤类型丰富多样, 涵盖从极地冰冻土到热带红壤、从湿润地带水稻土到干旱区的荒漠土, 构成多样的土壤生态系统。土壤类型的空间差异也使得土壤对扰动的响应能力和恢复力存在显著差异。综上, 我国地形复杂、气候差异显著、土壤类型多样, 这为本研究开展全国尺度的土壤恢复力评价提供了独特而坚实的自然基础和丰富的区域对比空间。

1.2 研究方法

1.2.1 概念界定 本研究在广泛梳理国内外文献、综合吸收权威专家观点基础上, 归纳提出: 土壤恢复力是指土壤在受到人为或自然环境的扰动后, 恢复到扰动前状态的能力。恢复力越强的土壤, 其功能恢复速度越快、程度越高, 可承受的扰动强度也越大。为明晰该概念的独立性与科学性, 需将其与易混淆概念做出区分。土壤质量强调土壤在当前条件下支撑植物生长和维持环境质量的能力, 是对土壤状态的“现时评价”; 而土壤恢复力侧重土壤功能状态变化的“过程性评估”, 是对土壤从退化状态恢复潜力的判断。土壤的缓冲、净化与过滤功能主要涉及土壤对污染物和营养盐的吸附、转化与截留, 指其环境调节能力; 而恢复力则涉及土壤自身理化特性受扰动后的重建过程。此外, 土壤抵抗力强调土壤在扰动下功能不发生明显下降的能力, 属于扰动初期的响应特征; 而恢复力着眼于扰动后功能的再生恢复, 是对土壤长期可持续性的关键衡量指标。

1.2.2 指标体系构建 本研究采用替代指标法构建宏观尺度土壤恢复力评价体系。基于文献梳理和理论基础, 综合考虑国内外土壤恢复力研究的指标使用频次、指标的生态学意义、专家建议和数据可获取性, 最终确定涵盖土壤条件、生物特性、地形条件及气候条件四个维度, 共 9 项具体评价指标^[22-23]。

1.2.3 层次分析法 该方法主要用于帮助决策, 是定性分析和定量分析的结合^[24-25]。在本研究中, 层次分析法应用于土壤恢复力评价指标体系的具体权重分配。研究邀请 9 位土地资源和土壤科学领域专家运用层次分析法, 构建判断矩阵进行两两比较, 确定各指标的相对权重, 并进行一致性检验以确保权重赋值的客观性和有效性。

1.2.4 GIS 空间分析与评价方法 结合替代指标法进行大尺度土壤恢复力综合评价。首先对各项评价指标进行隶属函数类型标准化处理。标准化后, 各指标数据被统一至 0~1 之间。随后运用 GIS 栅格计算模块, 根据指标权重进行逐单元加权求和, 得到每个评价单元的土壤恢复力综合指数。为直观反映空间差异, 利用自然断点法 (Jenks), 将计算所得指数结果分为“较低恢复力”、“一般恢复力”、“较高恢复力”和“高恢复力”4 个等级, 生成全国土壤恢复力空间分异图。

1.2.5 土壤恢复力验证方法 为验证土壤恢复力评价结果的科学性与可靠性, 本研究选取粮食单位面积年产量的变异系数作为验证指标。首先计算 1996—2017 年各省粮食单位面积产量, 随后在 ArcGIS 中, 将土壤恢复力评价结果使用分区统计工具, 与图层叠加得到的土壤恢复力指数以省为单位进行分区, 每个省的恢复力指数为该省行政界线内所有像素点土壤恢复力指数值的平均值。最后在 Origin 软件中, 以粮食单产变异系数为自变量、土壤恢复力指数为因变量进行回归分析, 从而检验二者关系。理论上, 土壤恢复力越强, 其理化性质在自然扰动后恢复得越快, 对产量波动的影响越小, 表现为变异系数较低。

1.3 数据来源

本研究所需土壤理化数据主要来源于“中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集 (2010—2018)”, 空间分辨率为 90 m, 涵盖土壤有机碳、土壤 pH、土壤质地、土壤阳离子交换量、土层厚度数据。利用 ArcGIS 对数据进行空间坐标系统转换、裁剪与重采样处理, 使所有数据统一到空间分辨率为 1 km×1 km 的栅格格式 (表 1)。同时, 结合土壤恢复力的实际应用考虑, 将本评价的研究对象确定为 0~30 cm 的表层土壤, 因原数据按照不同土层厚度区分, 因此采用加权求和法计算得出 0~30 cm 的数据。土壤生物多样性数据选取欧洲土壤数据中心 (ESDAC) 发布的 10 km 分辨率数据, 经 ArcGIS 软件进行尺度调整至统一的栅格尺度。土壤生物多样性是指地下生物多样性, 以及它们所贡献和所属的生态复合体。坡度数据依据中国 90 m 分辨率的数字高程模型 (DEM) 推导而得。气候因素参考《中国气候区划图》(1:800 万, 1981—2010 年) 矢量

数据^[26]。土壤类型数据源于“1：100 万中华人民共和国土壤图”（1995 年），通过 ArcGIS 矢量-栅格转换获得。此外，本研究采用 1996—2017 年各省统计年鉴的粮食单产波动系数作为验证数据。

表 1 数据来源

Table 1 Data source

数据 Data	来源 Source
土壤理化数据 Soil physical and chemical data	国家地球系统科学数据中心 (https://soil.geodata.cn/ztsj.html)
土壤生物多样性 Soil biodiversity	欧洲土壤数据中心 (https://esdac.jrc.ec.europa.eu)
坡度 Slope	资源环境平台 (https://www.resdc.cn/)
气候 Climate	(中国气候区划, 1981—2010) ^[26]
土壤类型 Soil type	资源环境平台 (https://www.resdc.cn/)
粮食产量 Grain output	国家统计局 (https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/)

2 结 果

2.1 土壤恢复力评价指标体系

本研究在系统梳理已有土壤恢复力评价文献的基础上，通过分析高频使用指标及其与土壤恢复力的相关性原理，并结合专家意见，使用频率与研究可行性，按照主导性、独立性、可行性等原则，最终选取了 9 项指标，涵盖土壤条件、生物特性、地形条件和气候条件 4 类。

（1）土壤条件：土壤条件指标涉及土壤有机质、土壤质地、土壤 pH、土壤阳离子交换量（CEC）、土层厚度。土层厚度决定了土壤对水分、养分的储存与释放能力^[27]，土层厚度越深，其保水保肥能力就越强^[28]。土壤有机质的分解过程会影响土壤中的微量元素含量，包括碳、氮、磷等，从而影响土壤内部养分的再生和循环，进而影响土壤的恢复力^[29-31]。因此土壤有机质通常被认为是农业可持续性的最重要指标^[32]。土壤 pH 决定了土壤中养分元素的有效性，中性土壤通常表现出较高的恢复力，而过酸或

过碱则会降低恢复能力^[33-36]。土壤质地在土壤的物理和生物恢复力方面有重要影响，更黏的土壤通过其聚集特性支撑了土壤的结构完整性^[37]。土壤阳离子交换量决定土壤对营养物质的保蓄能力和缓冲性能，也是评价土壤保肥能力、改良土壤和合理施肥的重要依据^[38-39]。

（2）生物特性：土壤生物多样性指标对土壤恢复力至关重要，作为可持续生产的关键特征^[40-43]，土壤生物多样性有助于土壤团聚体的形成，而土壤团聚体有助于土壤的稳定性^[44]。多样性较高的土壤在面对扰动时表现出更强的稳定性和恢复能力^[45-46]。因此，本文选取生物多样性指标反映土壤生态系统功能。

（3）气候条件：温度对植物和土壤微生物的生长活动有重大影响，与土壤中水分、盐分和空气的运动也密切相关，直接关系到土壤中各种化学反应的进行。水分是土壤的重要组成部分，积极参与土壤的物质转化过程，在土壤形成和发育中起关键作用，对加速土壤中的物质转化、提高土壤肥力及作物产量有重要意义^[47-50]。二者共同作用对土壤产生影响，因此研究将气温、降水作为气候条件影响土壤恢复力的指标。

（4）地形条件：在相同降水量条件下，地面接收降水的状况因地形不同而异，在平坦地形上较为一致，土壤湿度比较均匀；在斜坡上常呈局部干旱且干湿变化剧烈，在斜坡上部一般土层较薄，质地较粗，养分易流失，土壤发育程度低。坡度越大，土壤的地表径流和侵蚀风险越高，不利于土壤性质的恢复^[51]。由上可知，对于土壤恢复力评价而言，坡度直接影响土壤侵蚀风险^[52]。本文选取坡度作为地形条件影响土壤恢复力的重要指标。

本研究土壤指标分级通过梳理国家大尺度土地评价中的《耕地质量等级》（GB/T 33469-2016）、《农用地质量分等规程》（GB/T 28407-2012）、《农用地定级规程》（GB/T 28405-2012）、《自然资源分等定级通则》（TD/T 1060-2021）等相关标准、第三次全国国土调查指标分级、相关专著及专家意见综合确定。指标打分根据不同分级按照 1~4 分逐级增加。在气候分区的打分过程中，本研究将温度带由低温到高温作为纵坐标，不同干湿区由湿润到干旱作为横坐标并分别赋分，以此确定二者相交而成的气候区的分数，再用 1~4 分进行逐级修正。指标体系构建（表 2）：

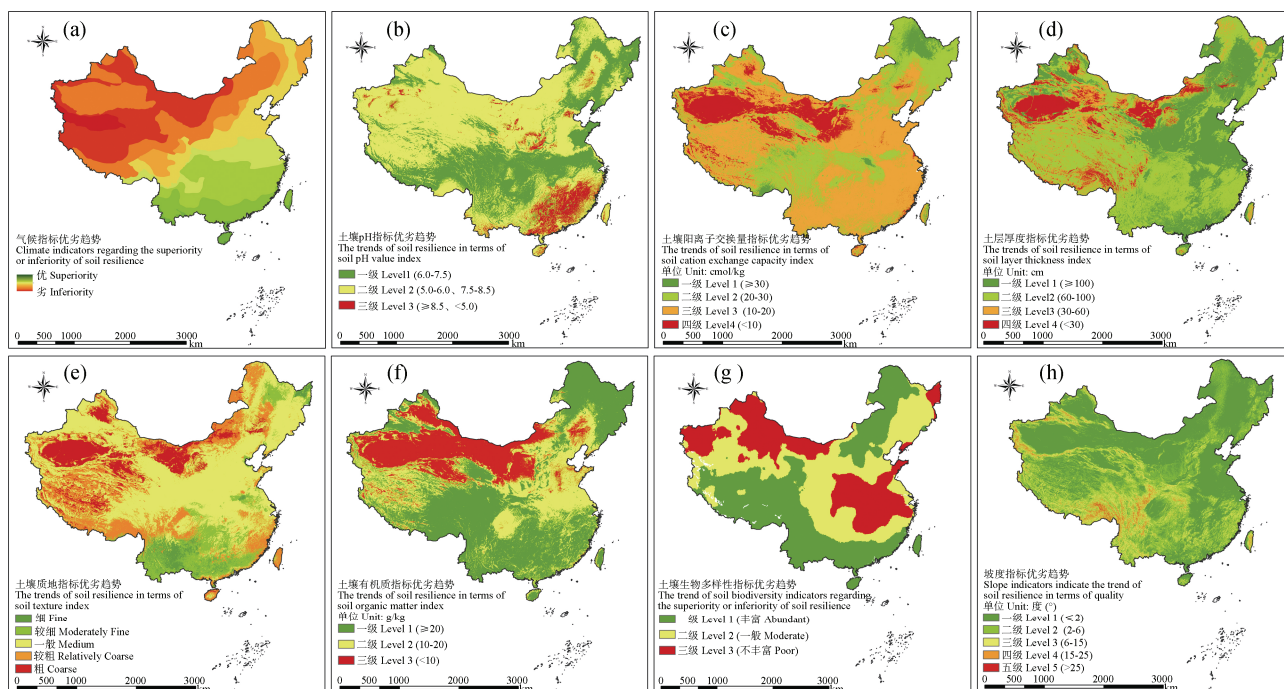
表 2 土壤恢复力评价指标体系
Table 2 Soil Resilience Assessment Indicator System

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	分级 Classification	打分 Score	描述 Description	权重 Weight
土壤恢复力 Soil resilience	土壤条件 Soil conditions	土层厚度 Soil layer thickness/cm	1 级	4	≥ 100	0.20
			2 级	3	60~100	0.20
			3 级	2	30~60	0.20
			4 级	1	<30	0.20
		土壤有机碳 Soil organic carbon (g·kg ⁻¹)	1 级	4	≥ 20	0.25
			2 级	2.5	10~20	0.25
			3 级	1	<10	0.25
		pH	1 级	4	6.0~7.5	0.15
			2 级	2.5	5.0~6.0, 7.5~8.5	0.15
			3 级	1	$\geq 8.5, <5.0$	0.15
	生物特性 Biological characteristics	土壤质地 Soil texture	1 级	4	细	0.25
			2 级	3.25	较细	0.25
			3 级	2.5	一般	0.25
			4 级	1.75	较粗	0.25
			5 级	1	粗	0.25
		阳离子交换量 CEC (cmol·kg ⁻¹)	1 级	4	≥ 30	0.15
			2 级	3	20~30	0.15
			3 级	2	10~20	0.15
			4 级	1	<10	0.25
			5 级	1	>25	0.15
	地形条件 Terrain conditions	坡度 Slope/ (°)	1 级	4	≤ 2	0.15
			2 级	3.25	2~6	0.15
			3 级	2.5	6~15	0.15
			4 级	1.75	15~25	0.15
			5 级	1	>25	0.15
	气候条件 Climatic conditions	气候区划 Climate zoning	按照不同区划的温度、降水赋分			0.15

2.2 土壤恢复力单因素指标评价

我国土壤恢复力相关因子的空间分异特征明显，首先从气候条件来看，气温与降水整体呈“东南高、西北低”格局，南方及中南部地区（如云南、广

东、海南）受季风气候影响，气候温暖湿润，有利于土壤系统自我恢复；而西北与北方地区（如新疆、甘肃、内蒙古）受干旱与寒冷气候制约，气候条件较差，不利于土壤恢复力（图 1a）。



注：该图基于自然资源部标准地图服务下载的审图号为 GS (2024) 0650 号的标准地图制作，底图无修改。下同。Note: This map is based on the standard map with review number GS (2024) 0650 downloaded from the standard map service of the Ministry of Natural Resources. The base map has not been modified. The same below.

图 1 气候 (a)、pH (b)、土壤阳离子交换量 (c)、土壤厚度 (d)、土壤质地 (e)、土壤有机质 (f)、土壤生物多样性 (g)、坡度 (h) 等指标优劣趋势分布

Fig. 1 Performance distribution of climate (a), pH (b), soil cation exchange capacity (c), soil thickness (d), soil texture (e), soil organic matter (f), soil biodiversity (g), slope (h) indicators

土壤 pH 表现出“南酸北碱”的分布特征,长江以南地区因强烈淋溶作用偏酸,北方则因土壤中碳酸钙、碳酸钠含量较高,碳酸根离子水解使土壤呈碱性,整体更利于土壤恢复力 (图 1b)。土壤阳离子交换量也呈现显著差异,中部与东北地区由于盐基离子淋失较少,有时盐基离子还相对富集,盐基饱和度高,同时土壤发育成熟,因此土壤阳离子交换量较高;而南方温度高、湿度大的气候导致矿物风化强烈,物质淋溶也强烈,大量盐基离子被淋失,盐基饱和度低,因此土壤阳离子交换量较低,不利于土壤恢复力 (图 1c)。在土壤结构属性方面,土层厚度与质地空间差异较大 (图 1d)。中部、东北与南方地区地形平缓、土层发育良好,普遍较厚,利于保水保肥,是土壤恢复力较强的区域。土壤质地方面,我国西南、南部和东北部分地区的土壤质地较细,有利于土壤恢复力,中部大部分地区土壤质地属于中等粗细,西部、西北及北部的大部分地

区土壤质地很粗,整体趋势分布呈现出从西向东和从北向南逐渐变细的趋势 (图 1e)。土壤有机质含量分布亦具有区域性特征,我国南部、中部及东北部部分地区土壤有机质更高,有利于土壤恢复力,西北、北部及东部部分地区土壤有机质含量较低,不利于土壤恢复力,整体趋势分异特征明显 (图 1f)。

土壤生物多样性在南方、西南山地和东北林区较高,这些区域气候条件优越、受干扰较少,生态系统完整性好,利于土壤恢复力;而西北干旱区和部分城市化严重的中部平原区生物多样性较低,不利于土壤恢复力 (图 1g)。坡度方面,我国西南部、中部、西部及东南沿海的少部分地区坡度较大,不利于土壤恢复力;北部、东部地区坡度更小,整体趋势差异并不明显 (图 1h)。

2.3 土壤恢复力评价

在 ArcGIS 中通过图层叠加法对各指标加权求和,并采用自然断点法将土壤恢复力划分为 4 级。

我国土壤恢复力总体呈现“由西向东、由北向南逐步增强”的分布格局。其中，高恢复力区占比 25%，较高恢复力区占 39%，一般恢复力区占 21%，较低恢复力区占 15%。土壤恢复力较强的区域主要集中在中部、南部和东北地区，如云南、贵州、广西、海南、广东、湖南，以及内蒙古东北部、黑龙江、吉林、辽宁的大部分地区（图 2）。土壤恢复力较弱的

区域多位于西部、西北和北部，如昆仑山脉、塔克拉玛干沙漠、天山山脉、古尔班通古特沙漠、库姆塔格沙漠、阿尔金山脉、嘎顺戈壁、柴达木盆地、祁连山脉、中央戈壁、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地、浑善达克沙地等。这些地区土层厚度较薄、土壤质地较粗、土壤有机质和土壤阳离子交换量低，气候条件更差，导致整体土壤恢复力较差。

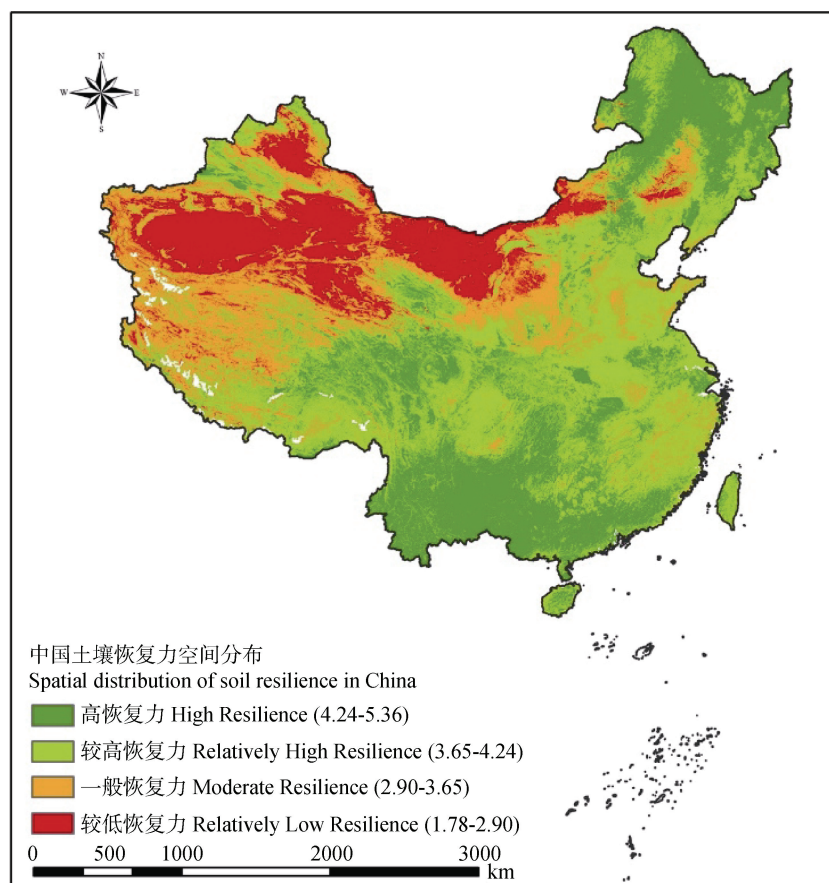


图 2 中国土壤恢复力空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of soil resilience in China

我国各省之间土壤恢复力等级差异明显，高土壤恢复力占比较大的省份是云南、广西、贵州，占比分别为 83%、81%、81%，较高土壤恢复力占比较大的省份是天津、北京、河南，占比分别为 92%、83%、82%，一般土壤恢复力占比较大的省份是宁夏、新疆、西藏，占比分别为 62%、59%、41%，较低土壤恢复力占比较大的省份是内蒙古、甘肃、新疆，占比分别为 31%、25%、18%（表 3）。

2.4 中国不同耕地分区土壤恢复力评价

农业区划是根据地区农业生产条件的相似性与差异性，综合分析农产品供需关系、主体功能与人

地关系特点，依据农业地域系统的演化机制与分异规律进行分区划片的过程。以农业区划单元为基础，分析土壤恢复力状况及敏感因子，有助于提升区域土壤管理水平，更好地服务农业生产。

我国九大耕地区的土壤恢复力呈现明显空间差异。甘新区整体恢复力偏低，较低恢复力土壤占比达 53%，仅新疆中部的天山山脉以及北部的阿尔泰山脉下的山前平原区因水热条件适宜而恢复力较强，其余多为沙漠、山地、戈壁等生态脆弱区域，受限于土层薄、质地粗、有机质和阳离子交换量低，土壤恢复力较差。青藏区则整体恢复力较高，高和

表 3 中国各省（直辖市、自治区）土壤恢复力等级分布（除港澳地区）

Table 3 Distribution of soil resilience grades in various provinces (municipalities and autonomous regions) of China (excluding Hong Kong and Macao Regions)

省份 ^①	高恢复力 ^② /%	较高恢复力 ^③ /%	一般恢复力 ^④ /%	较低恢复力 ^⑤ /%	省份 ^①	高恢复力 ^② /%	较高恢复力 ^③ /%	一般恢复力 ^④ /%	较低恢复力 ^⑤ /%
安徽	24	65	10	0	辽宁	19	71	10	0
北京	15	83	2	0	内蒙古	25	26	17	31
福建	13	74	13	0	宁夏	0	26	62	11
甘肃	9	28	38	25	青海	19	40	24	16
广东	73	27	0	0	山东	0	74	26	0
广西	81	19	0	0	山西	9	65	26	0
贵州	81	17	2	0	陕西	12	49	36	2
海南	33	64	3	0	上海	37	63	0	0
河北	15	71	14	0	四川	34	61	5	0
河南	5	82	13	0	台湾	21	78	2	0
黑龙江	77	22	1	0	天津	7	92	1	0
湖北	35	63	2	0	西藏	9	47	41	3
湖南	43	54	3	0	新疆	2	21	59	18
吉林	41	46	13	0	云南	83	17	1	0
江苏	24	75	1	0	浙江	10	69	21	0
江西	11	75	14	0	重庆	31	64	4	0

Province(municipalities and autonomous regions), ②High resilience, ③Relatively high resilience, ④Moderate resilience, ⑤ Relatively low resilience

较高恢复力土壤合计占比达 63%，优势区域集中在四川北部及与西藏、青海接壤的地区，因人工干预较少的山区林地区，而西藏北部和青海西部、北部的青藏高原，从昆仑山脉延伸至柴达木盆地等地，土层厚度较薄、土壤质地较粗、有机质含量较低、阳离子交换量较低、气候条件更差，故土壤恢复力较低。

黄土高原区以较高与一般恢复力为主，恢复力较差的地区主要集中在毛乌素沙地及腾格里沙漠周边。西南区恢复力表现优异，高恢复力土壤占比超过 50%，恢复力一般的区域主要位于四川盆地西部（成都市附近）及川渝黔交界的乌蒙山一带，前者或受城市化与高强度利用影响，后者受较粗质地与偏低有机质的限制。

华南地区在高与较高恢复力土壤占比高达 99%，与其良好的水热条件、较厚土层、细土壤质

地、高有机质含量与丰富的生物多样性有关。内蒙古及长城沿线耕区土壤恢复力差异较大，西部浑善达克沙地和大兴安岭东侧辽河平原因质地较粗、有机质和土壤阳离子交换量偏低，且土壤 pH 偏酸等因素，土壤恢复力相对较低。

黄淮海区恢复力整体较高，较高恢复力占比 77%，恢复力较低的土壤主要位于山东西部、东部的部分地区，位于华北平原及山东丘陵，该地区地势平缓，可能因多条河流经过并入海，造成土壤有机质及土壤阳离子交换量的流失、土壤生物多样性的降低。长江中下游区土壤恢复力水平较高，高与较高恢复力土壤占比 92%，长江中下游区的主要限制因素是华北平原及长江中下游平原土壤生物多样性不丰富、土壤阳离子含量较低、土壤 pH 偏酸性、土壤质地较粗，该地区坡度平缓，可能因多条河流冲刷导致。东北区恢复力也表现优越，仅东北平原

及辽东半岛区域土壤恢复力一般，土壤质地较粗、土壤 pH 较高、低阳离子交换量、低土壤有机质以及较为寒冷的气候。

不同耕地区土壤恢复力差异显著。高恢复力占比最高的为华南区（74%）、东北区（59%）和西南区（54%）；较高恢复力占比最高的为黄淮海区（77%）、长江中下游区（65%）和黄土高原区（50%）；一般恢复力占比较高的为黄土高原区（44%）、甘新区（35%）和青藏区（30%）；较低恢复力占比较大的为甘新区（53%）、内蒙古及长城沿线区（11%）和青藏区（7%）。总体来看，华南区、西南区、长

江中下游区的高与较高恢复力合计占比达 99%、97%、92%，具备较强的农业支撑能力；而甘新区、黄土高原区和青藏区的一般与较低恢复力合计占比分别为 88%、46%、37%，应降低利用强度，加强土壤养护，实现可持续利用（表 4）。

不同省份 22 年的粮食单产变异系数与土壤恢复力指数回归分析结果表明，二者呈显著负相关性，相关系数为-0.48（ $P<0.05$ ）。因此，土壤恢复力越高，粮食单产变异系数越低的理论依据得到证实，同时验证了本研究的土壤恢复力理论基础及评价指标体系具有一定的科学性和客观性。

表 4 中国耕地区土壤恢复力等级分布

Table 4 The distribution of soil resilience grades in cultivated land areas of China

耕地区 Cultivated land area	高恢复力 High resilience /%	较高恢复力 Relatively high resilience/%	一般恢复力 Moderate resilience/%	较低恢复力 Relatively low resilience/%
华南区 ^①	74	25	1	0
东北区 ^②	59	36	5	0
甘新区 ^③	1	11	35	53
黄淮海区 ^④	6	77	17	0
黄土高原区 ^⑤	4	50	44	2
内蒙古及长城沿线区 ^⑥	27	42	19	11
青藏区 ^⑦	17	46	30	7
西南区 ^⑧	54	43	3	0
长江中下游区 ^⑨	27	65	8	0

①South China Region, ②Northeast China Region, ③Gansu-Xinjiang Region, ④Huang-Huai-Hai Plain Region, ⑤Loess Plateau Region, ⑥Inner Mongolia and Great Wall Region, ⑦Qinghai-Xizang Plateau Region, ⑧Southwest China Region, ⑨Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Region

3 讨 论

3.1 中国土壤发生分类不同土类土壤恢复力结果

土壤分类是指根据土壤自身的发生、发展规律，依据不同土壤之间的相似性和差异性，系统编排各类土壤位置的过程，是土地利用和管理的重要科学基础。本研究以 1992 年汇总第二次全国土壤普查成果，编撰《中国土壤》时拟定的《中国土壤分类系统》为依据，选取土类这一能综合代表成土过程和属性差异的单元，对我国 57 个主要土类的土壤恢复力进行定量分析，建立了土壤恢复力指数与土壤分

类的对应关系，以更好地指导不同土类区域的土地利用和养护。

我国各土类中恢复力较强的为黑土、赤红壤、泥炭土、黑钙土、砖红壤、暗棕壤等，这些土类能承受更大的土地利用强度；恢复力较差的为风沙土、龟裂土、灰漠土、灰棕漠土、棕漠土等，这些土类应降低土地利用强度，格外注意土壤的养护，以更好地可持续利用（表 5）。

3.2 局限与展望

由于数据限制与研究能力所限，本文从气候、地形、土壤和生物四个自然因素出发建立指标体系，可能仍不够全面，气候因素采用气候区划图来表征，

表 5 中国土壤发生分类不同土类土壤恢复力指数次序

Table 5 Soil resilience index sequence for different soil types in soil classification in China

排名	土类	恢复力指数	排名	土类	恢复力指数
Rank	Soil Types	Resilience index	Rank	Soil types	Resilience index
1	黑土	4.76	30	红黏土	3.84
2	赤红壤	4.49	31	粗骨土	3.81
3	泥炭土	4.36	32	漂灰土	3.79
4	黑钙土	4.31	33	栗钙土	3.79
5	砖红壤	4.31	34	新积土	3.72
6	暗棕壤	4.30	35	寒冻土	3.70
7	沼泽土	4.29	36	黑垆土	3.68
8	灰色森林土	4.29	37	黄绵土	3.64
9	酸性硫酸盐土	4.27	38	灌淤土	3.54
10	火山灰土	4.25	39	碱土	3.54
11	燥红土	4.24	40	棕冷钙土	3.53
12	水稻土	4.24	41	灌漠土	3.50
13	山地草甸土	4.23	42	寒钙土	3.49
14	黄壤	4.22	43	寒原盐土	3.37
15	紫色土	4.20	44	冷钙土	3.34
16	红壤	4.19	45	灰钙土	3.32
17	砂姜黑土	4.19	46	寒漠土	3.21
18	黄棕壤	4.18	47	石质土	3.19
19	草甸土	4.14	48	棕钙土	3.08
20	黄褐土	4.14	49	盐土	3.08
21	棕色针叶林土	4.13	50	冷漠土	2.94
22	黑毡土	4.12	51	林灌草甸土	2.86
23	棕壤	4.10	52	棕漠土	2.73
24	草毡土	4.10	53	漠境盐土	2.72
25	灰褐土	4.08	54	灰棕漠土	2.69
26	褐土	3.90	55	灰漠土	2.63
27	滨海盐土	3.90	56	龟裂土	2.57
28	潮土	3.88	57	风沙土	2.55
29	栗褐土	3.86			

其划分依据为降水与气温的综合特征，能够在宏观上反映气候差异，但受限于数据来源，其空间分辨率（1：800 万）与土壤属性图存在差异。然而，考虑到本研究面向全国尺度的土壤恢复力评价，该分辨率仍具备较好的适用性。在地形因素方面，高程

与坡向确实对土壤发生过程有较大影响，但受限于大尺度评价中坡向数据获取与处理的难度，本研究未将坡向纳入指标体系。结合文献统计与专家意见，选择坡度作为更具代表性的地形指标用于评价。未来研究可进一步细化气候与地形指标，并优化其空

间分辨率,以提升评价精度与适用性。未来还可引入社会经济维度,如耕作制度、耕作者受教育水平与农业集约化程度等,以提升评价体系的科学性与适用性。

本研究暂未考虑酸化、土壤板结、盐渍化对应的土壤恢复力的韧性是不同的,这类扰动类型差异所引发的土壤响应机制差异,也值得在未来研究中进一步探讨。此外,尽管本文通过粮食产量波动系数验证土壤恢复力的合理性,但单产受多种因素影响,现有验证方法的科学性仍需加强,未来应探索更严谨的验证路径。最后,考虑到实践中土壤通常同时面临扰动与恢复的双重过程,因此建议未来研究从“土壤稳定性”的视角综合考虑抵抗力与恢复力的交互机制,以更有效地指导土壤资源的可持续管理。

4 结 论

为增强土壤恢复力的应用研究,本文界定了其概念内涵,构建了宏观尺度的评价指标体系,并利用 ArcGIS 绘制全国分异图,最后进行结果分析与验证。主要结论如下:

(1) 土壤恢复力是指土壤在受到人为或自然环境的扰动后,恢复到扰动前状态的能力。土壤恢复力越高,恢复到扰动前的速度越快,相同时间恢复的程度越大。若扰动剧烈或土壤本身恢复力弱,可能发生不可逆退化。(2) 从土壤性质、气候因素、地形与生物特性四方面选取土壤质地、土层厚度、土壤有机质、土壤阳离子交换量、土壤 pH、气温、降水、坡度、土壤生物多样性 9 项指标构建评价框架,通过文献调研、专家咨询、层次分析法确定分级与权重,形成具有针对性的土壤恢复力评价体系。(3) 在 ArcGIS 工具中使用图层叠加法加权求和得到我国土壤恢复力分异图。我国土壤恢复力水平具有明显的地域分异特征,呈现由西向东、由北向南逐步增加的趋势。全域土壤中,属于高恢复力标准的占比 25%,属于较高恢复力标准的占比 39%,属于一般恢复力标准的占比 21%,属于较低恢复力标准的占比 15%。在中国九大耕地区中,土壤恢复力最强的是华南区,高恢复力与较高恢复力土壤占比为 99%,西南区次之,为 97%;土壤恢复力最差的是甘新区,一般恢复力与较低恢复力土壤占比为 88%,

青藏区次之,为 37%。

参考文献 (References)

- [1] Lal R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation[J]. Sustainability, 2015, 7(5): 5875—5895.
- [2] Smith P, House J I, Bustamante M, et al. Global change pressures on soils from land use and management[J]. Global Change Biology, 2016, 22(3): 1008—1028.
- [3] Veresoglou S D, Halley J M, Rillig M C. Extinction risk of soil biota[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8862.
- [4] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet[J]. Nature, 2011, 478(7369): 337—342.
- [5] León J D, Osorio N W. Role of litter turnover in soil quality in tropical degraded lands of Colombia[J]. The Scientific World Journal, 2014(1): 693981.
- [6] Lamb D, Erskine P D, Parrotta J A. Restoration of degraded tropical forest landscapes[J]. Science, 2005, 310(5754): 1628—1632.
- [7] Oerke E C. Crop losses to pests[J]. The Journal of Agricultural Science, 2006, 144(1): 31—43.
- [8] Tilman D, Fargione J, Wolff B, et al. Forecasting agriculturally driven global environmental change[J]. Science, 2001, 292(5515): 281—284.
- [9] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1973): 1—23.
- [10] Pimm S L. The complexity and stability of ecosystems[J]. Nature, 1984, 307(5949): 321—326.
- [11] Yu W J. Resilience of vegetation and soil on abandoned slope in the hill-gully Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2018. [于卫洁. 黄土丘陵沟壑区退耕坡面植被与土壤恢复力评价[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.]
- [12] Fait G, Broos K, Zrna S, et al. Tolerance of nitrifying bacteria to copper and nickel[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2006, 25(8): 2000—2005.
- [13] Zhao R. Theoretical and empirical study on county cultivated land health evaluation[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019. [赵瑞. 县域耕地健康评价理论与实证研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.]
- [14] Xiao X Y. Study on ecosystem resilience of cultivated land in urban suburbs: A case study of Qingpu District, Shanghai[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019. [肖秀英. 都市郊区耕地生态系统恢复力研究——以上海市青浦区为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.]
- [15] Yang X F, Cai H S, Zhang X L, et al. Study on comprehensive evaluation and zoning of selenium-enriched arable land quality: A case study of Yuanzhou district, Yichun[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis: Natural Sciences Edition, 2023, 45(2):

- 482—493. [杨晓帆, 蔡海生, 张学玲, 等. 富硒耕地质量综合评价及利用分区研究——以宜春市袁州区为例[J]. 江西农业大学学报(自然科学版), 2023, 45(2): 482—493.]
- [16] Li Z Q, Zhao X Y, Zhang L K, et al. Cultivated land quality grading method based on LESA comprehensive evaluation model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 363—367, 375. [李卓倩, 赵贤好, 张莉坤, 等. 基于 LESA 综合评价模型的耕地质量定级方法[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 363—367, 375.]
- [17] Huang S T, Fan S P. Analysis on the relationship between dynamic changes of cultivated land resources and grain production in China[J]. Shanxi Agricultural Economy, 2021(13): 146—148. [黄舒婷, 范树平. 我国耕地资源动态变化与粮食生产关系剖析[J]. 山西农经, 2021(13): 146—148.]
- [18] [Manyena S B. The concept of resilience revisited[J]. Disasters, 2006, 30(4): 433—450.]
- [19] Brand F S, Jax K. Focusing the meaning(s) of resilience: Resilience as a descriptive concept and a boundary object[J]. Ecology and Society, 2007, 12: art23.
- [20] Klein R J T, Nicholls R J, Thomalla F. Resilience to natural hazards: How useful is this concept [J]. Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards, 2003, 5(1/2): 35—45.
- [21] France K E, Duffy J E. Diversity and dispersal interactively affect predictability of ecosystem function[J]. Nature, 2006, 441(7097): 1139—1143.
- [22] 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.
- [23] 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.]
- [24] Li L, Xie X Q, Qin F L. Evaluating the soil suitability index of key chemical element and predicting its spatial distribution map in Yuxi City, China[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2024, 46(5): 972—979. [李兰, 谢新乔, 秦发倡. 玉溪市植烟土壤关键化学元素适宜性评价及其空间分布[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2024, 46(5): 972—979.]
- [25] Li Z H, Liu X H, Xia X Q, et al. Spatiotemporal dynamics and multiscale drivers of agricultural soil erosion in the North China Plain from 1990 to 2020[J]. Geoscience, 2025, 39(2): 467—477. [李志恒, 刘晓煌, 夏学齐, 等. 1990—2020 年华北平原耕地地区土壤侵蚀强度时空演变及驱动力分析[J]. 现代地质, 2025, 39(2): 467—477.]
- [26] Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. The climate regionalization in China for 1981—2010[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(30): 3088—3099. [郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981—2010 年中国气候区划[J]. 科学通报, 2013, 58(30): 3088—3099.]
- [27] Yi C, Li D C, Zhang G L, et al. Criteria for partition of soil thickness and case studies[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1): 220—227. [易晨, 李德成, 张甘霖, 等. 土壤厚度的划分标准与案例研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 220—227.]
- [28] Ares J, Bertiller M, del Valle H. Functional and structural landscape indicators of intensification, resilience and resistance in agroecosystems in southern Argentina based on remotely sensed data[J]. Landscape Ecology, 2001, 16(3): 221—234.
- [29] Maul R S, Holland M M, Mikell A T, et al. Resilience of forested wetlands located in the southeastern United States: Demonstration of a soil perturbation index[J]. Wetlands, 1999, 19(1): 288—295.
- [30] Ren Y, Yin Q Y, Yin J L, et al. Comparison of predictive methods for spatial distribution of SOM in cultivated land in the south subtropical karst region[J]. Soils, 2025, 57(3): 673—682. [任艳, 尹秋月, 尹晋磊, 等. 南亚热带典型岩溶区耕地土壤有机质空间分布预测的方法比较[J]. 土壤, 2025, 57(3): 673—682.]
- [31] Zhao Y F, Li Y X, Ma P P, et al. Three dimensional changes of soil organic carbon content and its key factors in cultivated soils of Henan Province during the recent 30 years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1409—1420. [赵彦锋, 李怡欣, 马盼盼, 等. 近 30 年河南省耕地土壤有机碳的三维变化与关键因素研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1409—1420.]
- [32] van Apeldoorn D F, Sonneveld M P W, Kok K. Landscape asymmetry of soil organic matter as a source of agro-ecosystem resilience[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 140(3/4): 401—410.
- [33] Tobor-Kaplon M A, Bloem J, Römkens P F A M, et al. Functional stability of microbial communities in contaminated soils near a zinc smelter (budel, the Netherlands)[J]. Ecotoxicology, 2006, 15(2): 187—197.
- [34] Wei H, Yang J Y, Liu Z Q, et al. Data integration analysis indicates that soil texture and pH greatly influence the acid buffering capacity of global surface soils[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 3017.
- [35] Hamidi N H, Ahmed O H, Omar L, et al. Acid soils nitrogen leaching and buffering capacity mitigation using charcoal and sago bark ash[J]. Sustainability, 2021, 13(21): 11808.
- [36] Xu D H, Carswell A, Zhu Q C, et al. Modelling long-term impacts of fertilization and liming on soil acidification at Rothamsted experimental station[J]. Science of the Total Environment, 2020, 713: 136249.
- [37] Corstanje R, Deeks L R, Whitmore A P, et al. Probing the

- basis of soil resilience[J]. *Soil Use and Management*, 2015, 31 (S1): 72—81.
- [38] Zhang Y J, Yu L, Cao Y P, et al. Spatial distribution of soil cation exchange capacity and its influencing factors in small watersheds of typical industrial and mining area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32 (4): 100—109. [张亚杰, 余力, 曹艳萍, 等. 典型工矿区小流域土壤阳离子交换量空间分布及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2025, 32 (4): 100—109.]
- [39] Liu L, Xie D T, Li Z Y, et al. Cations exchange and its effect on acid buffering capacity of acid purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (4): 887—897. [刘莉, 谢德体, 李忠意, 等. 酸性紫色土的阳离子交换特征及其对酸缓冲容量的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (4): 887—897.]
- [40] Yachi S, Loreau M. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis[J]. *PNAS*, 1999, 96 (4): 1463—1468.
- [41] Griffiths B S, Philippot L. Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2013, 37 (2): 112—129.
- [42] Li J L. Thoughts on the relationship between microbial diversity and stability in soil ecosystem[J]. *Technology Wind*, 2017 (12): 237. [李俊乐. 土壤生态系统微生物多样性-稳定性关系的思考[J]. *科技风*, 2017 (12): 237.]
- [43] Li Y Z, Zhang J Z, Jia J Y, et al. Research progresses on farmland soil ecosystem multifunctionality[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (5): 1177—1189. [李奕赞, 张江周, 贾吉玉, 等. 农田土壤生态系统多功能性研究进展[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (5): 1177—1189.]
- [44] Lu J W, Li Z B. Advance in soil aggregate study[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9 (1): 81—85. [卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. *水土保持研究*, 2002, 9 (1): 81—85.]
- [45] Girvan M S, Campbell C D, Killham K, et al. Bacterial diversity promotes community stability and functional resilience after perturbation[J]. *Environmental Microbiology*, 2005, 7 (3): 301—313.
- [46] Griffiths B S, Ritz K, Bardgett R D, et al. Ecosystem response of pasture soil communities to fumigation-induced microbial diversity reductions: An examination of the biodiversity–ecosystem function relationship[J]. *Oikos*, 2000, 90 (2): 279—294.
- [47] Feng X J, Simpson M J. Temperature and substrate controls on microbial phospholipid fatty acid composition during incubation of grassland soils contrasting in organic matter quality[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 (4): 804—812.
- [48] Ayala-Orozco B, Gavito M E, Mora F, et al. Resilience of soil properties to land-use change in a tropical dry forest ecosystem[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29 (2): 315—325.
- [49] Zhao R, Wu K N. Soil health evaluation of farmland based on functional soil management—A case study of Yixing City, Jiangsu Province, China[J]. *Agriculture*, 2021, 11 (7): 583.
- [50] Yin B N, Zhu Q, Liao K H. Temporal stability of surface soil moisture and its influencing factors in Yangtze River Delta Region[J]. *Soils*, 2024, 56 (6): 1358—1370. [殷贝妮, 朱青, 廖凯华. 长三角区域表层土壤水分时间稳定性及其影响因子[J]. *土壤*, 2024, 56 (6): 1358—1370.]
- [51] Li Q L, Li X M, Qiu J J, et al. Downscaling of multi-source soil moisture data based on Convolutional Neural Network[J/OL]. *Water Resources Protection*, 2025: 1-9. (2025-05-19). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SZYB20250518006&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. [李巧玲, 李晓梅, 仇娟娟, 等. 基于卷积神经网络的多源土壤湿度数据降尺度[J/OL]. *水资源保护*, 2025: 1-9. (2025-05-19). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SZYB20250518006&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.]
- [52] de Andrade Bonetti J, 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 and Tillage Research*, 2017, 174: 104—112.

(责任编辑：檀满枝)