

《红壤旱地土壤健康评价和培育技术规程》

编制说明

主要包括：

一、工作简况：包括任务来源、协作单位、主要工作过程、起草组成员及其所做的主要工作等；

二、标准编制原则和确定标准主要内容（如技术指标、参数、公式、性能要求、试验方法、检验规则等）的论据；标准修订项目还应当列出新、旧标准水平的对比；

三、主要试验（或验证）的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效果；

四、标准涉及的相关知识产权说明；

五、采用国际标准的程度与水平的简要说明，与现行有关法律法规和强制性标准的关系；

六、重大意见分歧的处理经过和依据；

七、其他应予说明的事

一、工作简况

（一）任务来源

本标准编制任务来源于中国农业科学院重大科技任务“典型区域耕地土壤健康评价与功能定向培育”（CAAS-ZDRW202408）、国家重点研发计划项目“南方红黄壤耕地复合障碍形成机理与生态调控关键技术”（2024YFD19001），开展标准的制定相关工作。

（二）协作单位

（1）牵头单位

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，组织实施标准起草工作及各起草单位之间的协调工作。

（2）参加单位

江西省红壤及种质资源研究所；中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所；中国农业大学；郑州大学；江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所；湖南省耕地与农业环境生态研究所；湖南农业大学；中国科学院亚热带农业生态研究所；中国水稻研究所、永州市农业综合服务中心等参与标准起草工作。

（三）主要工作过程

1、调研、资料收集

2023年6月至12月，中国农业科学院农业资源与农业区划研究所联合江西省红壤及种质资源研究所等单位，针对红壤区耕地健康评价指标不一，且各项指标的评价权重不清，缺乏较为系统的耕地健康评价指标与标准，同时耕地健康与功能定向培育关键技术缺乏标准，

通过文献资料及红壤区相关定位试验历史数据的整理，形成了红壤区耕地土壤健康评价和培育技术的实施方案。

2、开展系列研究工作

2024 年 1 月至 12 月，基于位于中国农业科学院祁阳红壤实验站和岳阳市农业科学研究院的长期定位试验，并结合湖南省祁阳市和汨罗市等县域的调查采样，通过测定土壤物理、化学、生物学指标，以及作物关键品质指标，明确了红壤旱地土壤健康评价的方法和最小数据集（关键指标体系），并集成了红壤旱地土壤健康培育关键技术。

2025 年 1 月至 12 月，在湖南省祁阳市、汨罗市和江西省进贤县、吉安区等地，首先对土壤健康评价的方法和指标进行了多点验证，并通过田间试验对红壤旱地土壤健康培育关键技术参数进行了优化。

3、标准起草和立项

2026 年 1 月至 4 月，根据大田试验结果，结合相关文献资料及国内外相关标准调研结果，编制组经多次讨论和修改，完成了标准草案编制。

2026 年 6 月提交草案至中国土壤学会开展标准立项函评。经函评专家评审论证，同意立项，中国土壤学会于 **2026 年 6 月 18 号**发布立项公告。

4、征求意见阶段

标准立项公示结束后，编制组根据立项函评专家意见进一步修改完善标准草案，完成征求意见初稿撰写工作。**2026 年 6 月**，编制组向 **11 家单位 13 位专家**进行意见征集，共收集专家反馈意见 **31 条**；

其中，采纳 31 条。2026 年 7 月，编制组根据征集意见对标准文本进行了修订；此外，因标准技术内容完善需求，经协调，永州市农业综合服务中心张艳峰、许欢、郭曦隆和胡议佳加入编制组，共同参与后续内容的修订工作。征求意见稿及编制说明撰写工作完成后，于 2026 年 8 月 11 日提交中国土壤学会。

（四）起草组成员及其所做的主要工作

标准制定过程主要由中国农业科学院农业资源与农业区划研究所、江西省红壤及种质资源研究所和中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所等单位的人员参与资料收集、文本完成、实验室比对、数据处理、田间验证和技术推广应用等工作。具体分工情况见表 1（标准起草组成员应当具备代表性，广泛吸收科研、生产、检测等方面的专家和技术人员参加。）

表 1 主要起草人员信息及任务分工

姓名	单位	职称	专业特长及分工
张会民	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	研究员	培肥改良，组织实施
黄晶	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	副研究员	土壤培肥，标准起草
柳开楼	江西省红壤及种质资源研究所	研究员	土壤培肥，标准起草
张楚	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	无	土壤培肥，参数构建和操作步骤设计
孙耿	湖南省耕地与农业环境生态研究所	副研究员	土壤培肥，参数构建和操作步骤设计
张洋	中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所	副研究员	土壤培肥，参数构建和操作步骤设计
张均华	中国水稻研究所	研究员	土壤培肥，参数构建和操作步骤设计
苏世鸣	中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所	研究员	土壤培肥，参数校对

陈金	江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所	研究员	土壤培肥，参数校对
张振华	湖南农业大学	教授	植物营养，参数校对
张艳峰	永州市农业综合服务中心	正高级农艺师	土壤培肥，参数校对
韩天富	郑州大学农学院	副教授	土壤培肥，参数构建和操作步骤设计
陈永亮	中国农业大学	副教授	土壤培肥，参数校对
翟丽梅	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	研究员	土壤培肥，参数校对
李冬初	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	正高级农艺师	土壤培肥，示范应用
刘淑军	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	高级农艺师	土壤培肥，示范应用
蔡岸冬	中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所	副研究员	土壤培肥，参数校对
刘立生	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	高级农艺师	土壤培肥，示范应用
申哲	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	无	土壤培肥，参数校对
陈先茂	江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所	研究员	土壤培肥，示范应用
尹子旭	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	无	土壤培肥，参数校对
李亚贞	江西省红壤及种质资源研究所	高级农艺师	土壤培肥，示范应用
张仙梅	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	副研究员	土壤培肥，示范应用
郭晓彬	中国科学院亚热带农业生态研究所	研究员	土壤培肥，示范应用
夏银行	湖南农业大学	副教授	土壤培肥，示范应用
刘佳	江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所	研究员	土壤培肥，示范应用
龙泽东	湖南省耕地与农业环境生态研究所	助理研究员	土壤培肥，示范应用
艾栋	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	无	土壤培肥，参数校对
刘泽弦	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	研究实习员	土壤培肥，示范应用
孙梅	湖南省耕地与农业环境生态研究所	助理研究员	土壤培肥，示范应用

吴春虹	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	无	土壤培肥，参数校对
许欢	永州市农业综合服务中心	农艺师	土壤培肥，示范应用
郭曦隆	永州市农业综合服务中心	农艺师	土壤培肥，示范应用
胡议佳	永州市农业综合服务中心	农艺师	土壤培肥，示范应用

二、标准编制原则和确定标准主要内容（如技术指标、参数、公式、性能要求、试验方法、检验规则等）的论据（包括试验、统计数据），修订标准时，应当列出新、旧标准水平的对比

（一）标准编制原则

本标准在遵循“科学性、先进性、实用性”基础上，严格按照《标准化工作导则》（GB/1.1-2020）、《农业法》、《农业管理条例》的要求进行编写。标准制定过程中严格贯彻国家有关方针、政策、法律和规章，严格执行强制性国家标准和行业标准。

一是科学性原则：围绕标准所需要的科学信息和技术背景，以最新的科学信息、科学证据和科学资料为基础，结合前期的研究基础、技术和经验的积累，客观并较为准确地表征南方红壤旱地健康定向培育技术过程，体现规范的内涵与特征，突出标准制定的科学性。

二是先进性原则：在广泛调研的基础上，充分吸收和利用现有科研成果和成熟技术，创新性引入土壤健康和作物健康“双核驱动”的耕地土壤健康等级划分方法，增加了土壤健康与作物健康关系的综合考量。

三是实用性原则：对南方红壤旱地土壤健康定向培育技术规范全过程的重点控制环节作规定，鉴定技术规范科学、简单、可操作性强。制定过程中充分考虑耕地健康评价流程的复杂程度，标准所用的技术参数均在生产中进行了验证熟化，评价流程清晰明了，确保规范的可用性，便于条款的执行实施。

（二）确定标准主要内容的论据

本文件满足 **GB/T 1.1-2020** 《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》规定的要求，主要内容包括范围、规范性引用文件、术语和定义、综合评价流程、定向培育技术。南方红壤旱地是我国南方地区重要的耕地资源，但长期高强度集约化种植和不合理施肥导致土壤呈现“酸、瘦、黏、板”等退化特征，亟需通过健康评价后再定向培育提升耕地质量。依据来自中国农业科学院农业资源与农业区划研究所、中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所等单位在湖南汨罗、岳阳等地的实地调查、定位试验和文献研究，通过整合土壤物理、化学、生物指标及作物健康数据，确立了本标准的科学性和可操作性。

1. 范围

本文件规定了南方红壤旱地土壤健康定向培育技术规程的具体方法，包括样品采集测试、土壤健康综合评分计算、作物健康综合评分计算、综合健康等级划分和定向培育技术。本文件适用于中国南方红壤旱地的玉米、油菜、花生、大豆、甘薯、芝麻等粮油作物生产，耕地健康等级评价单元为行政村及以上。

2. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件将必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 5009.5-2016 食品安全国家标准食品中蛋白质的测定

GB 5009.6-2016 食品安全国家标准食品中脂肪的测定

GB 5009.9-2016 食品安全国家标准食品中淀粉的测定

GB 5009.124-2016 食品安全国家标准食品中氨基酸的测定

GB 5009.168-2016 食品安全国家标准食品中脂肪酸的测定

GB 15618-2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)

GB/T 17141-1997 土壤质量铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法

GB/T 22105.1-2008 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法
第 1 部分：土壤中总汞的测定

GB/T 22105.2-2008 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法
第 2 部分：土壤中总砷的测定

GB/T 22105.3-2008 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法
第 3 部分：土壤中总铅的测定

GB/T 39228-2020 土壤微生物生物量的测定 熏蒸提取法

GB/Z 41359-2022 土壤质量呼吸曲线法测定土壤微生物区系的丰度和活性

NY/T 523-2020 专用籽粒玉米和鲜食玉米

NY/T 889-2004 土壤速效钾和缓效钾含量的测定

NY/T 1121.1-2006 土壤检测 第 1 部分：土壤样品的采集、处理和贮存

NY/T 1121.2-2006 土壤检测 第 2 部分：土壤 pH 的测定

NY/T 1121.4-2006 土壤检测 第 4 部分：土壤容重的测定

NY/T 1121.6-2006 土壤检测 第 6 部分：土壤有机质的测定

NY/T 1121.7-2014 土壤检测 第 7 部分：土壤有效磷的测定

NY/T 1121.19-2008 土壤检测 第 19 部分：土壤水稳性大团聚体组成的测定

NY/T 1209-2020 农作物品种试验与信息化技术规程 玉米

NY/T 3443-2019 石灰质改良酸化土壤技术规范

NY/T 3499-2019 受污染耕地治理与修复导则

HJ 491-2009 土壤总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法

HJ 889-2017 土壤阳离子交换量的测定 三氯化六氨合钴浸提-分光光度法

LY/T 1229-1999 森林土壤水解性氮的测定

3. 土壤健康综合评价流程的确定及依据

本标准规定了土壤健康综合评分和作物健康综合评分计算流程，包括样品采集、指标测试、评分计算和等级划分，依据汨罗市域土壤健康指数研究，通过主成分分析等方法计算健康评分，结果显示土壤健康指数分布广泛，为等级划分提供数据基础。汨罗市域土壤健康指数呈现空间变异，南部地区指数较高，西北部较低，与地形和水系分布相关。

此流程依据 GB/T 39228-2020 等规范性文件，确保指标测试标准化，同时参考张江周等（2022）研究，强化了评价的系统性。

4. 定向培育技术要求的依据

定向培育技术根据土壤健康等级推荐，包括秸秆还田、有机无机

配施、控酸培肥等措施。依据岳阳定位试验数据，不同管理措施显著影响土壤指标，**NPKS** 处理（秸秆还田）土壤容重最低（**1.14 g/cm³**），水稳性大团聚体比例最高（**44.94%**）。优化培育技术可提升玉米产量（如 **NPKC** 处理增产 **39.12%**）和土壤生态系统多功能性。有机质和全氮是健康驱动关键指标。技术内容参考 **NY/T 3443-2019** 等标准，确保控酸、培肥等措施的可行性。

5. 样品采集和测试方法的依据

样品采集按 **NY/T 1121.1-2006** 执行，测试方法引用 **GB**、**NY/T** 等系列标准，如土壤 **pH** 按 **NY/T 1121.2-2006**、有机质按 **NY/T 1121.6-2006**。测试方法依据国际通用规范，如微生物量碳按 **GB/T 39228-2020**，支撑了数据的可比性和重复性。

6. 作物健康评价的依据

作物健康综合评分结合品质指数和相对产量，依据玉米、花生、油菜等作物品质数据（如玉米蛋白质含量 **56.65%±4.65**），作物健康与土壤健康正相关，评分方法参考附件 **3**：中国植物营养与肥料学会团体标准草案中的附录 **B**，通过归一化处理消除量纲影响，确保评价的全面性。此举解决了传统评价中“土壤-产量-品质”不匹配的问题，符合农业绿色转型需求。本文件技术内容基于多年定位试验和县域调研，确保了普适性和经济性，为南方红壤旱地质量提升提供标准化支撑。

（三）新旧标准对比

无。

三、主要试验（或验证）的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效果

（一）主要试验（或验证）的分析、综述报告

本标准在相关单位及实施地区进行应用和验证的情况。

1 南方红壤旱地典型县域土壤指标的变化特征

1.1 土壤物理指标描述性统计

汨罗市域红壤旱地土壤物理指标整体情况如下图(图 1-1)所示。土壤容重在 1.03-1.72 g/cm³ 之间，平均值为 1.32 g/cm³，变异系数为 9.65%（图 1-1(a)）。土壤水稳性团聚体（>0.25 mm）的占比在 4.86-69.54%之间，平均占比为 31.13%，变异系数为 44.93%（图 1-1(b)）。土壤的平均重量直径平均值为 0.50 mm、几何平均直径平均值为 0.14 mm、向量长度稳定性指数平均值为 0.21（图 1-1(c-e)），其变异系数分别为 45.44%、69.38%、40.19%。

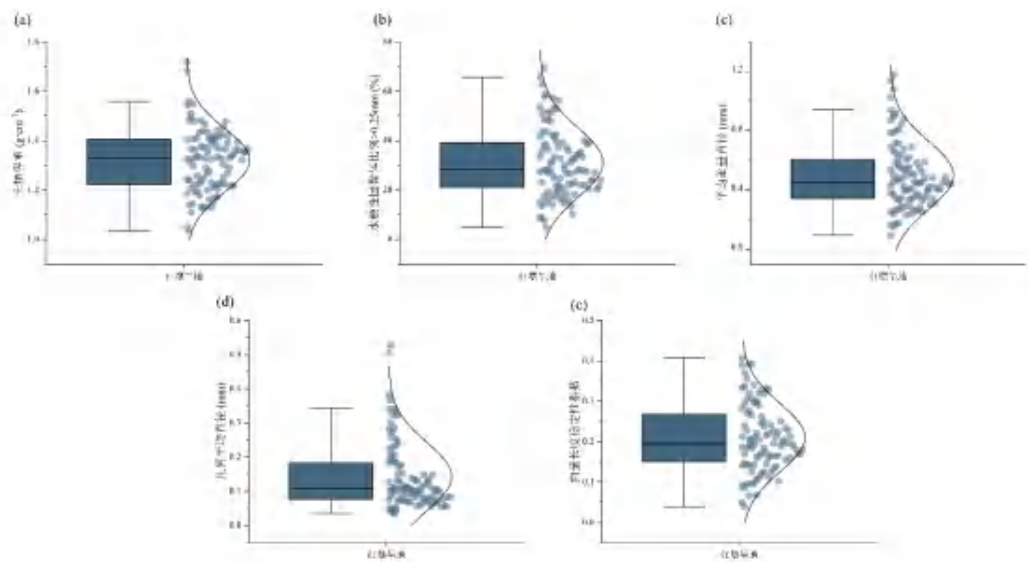


图 1-1 汨罗市域红壤旱地土壤物理指标

1.2 土壤化学指标描述性统计

汨罗市域红壤旱地土壤的 pH 值在 4.18-8.13 之间,平均值为 5.16, 变异系数为 14.34% (图 1-2(a))。统计分析汨罗市域红壤旱地土壤不同养分可知,整体上,土壤有机质含量为 18.12 g/kg, 变异系数为 36.99% (图 1-2(b)); 就土壤全效养分含量而言,全氮含量为 1.11 g/kg、全磷含量为 0.77 g/kg、全钾含量为 18.72 g/kg, 变异系数范围为 30.34%~51.07% (图 1-2(c-e)); 就土壤速效养分含量而言,速效氮含量为 107.23 mg/kg、有效磷含量 38.74 mg/kg、速效钾含量为 188.23 mg/kg (图 1-2(f-h)), 变异系数范围为 49.75%~83.25%。

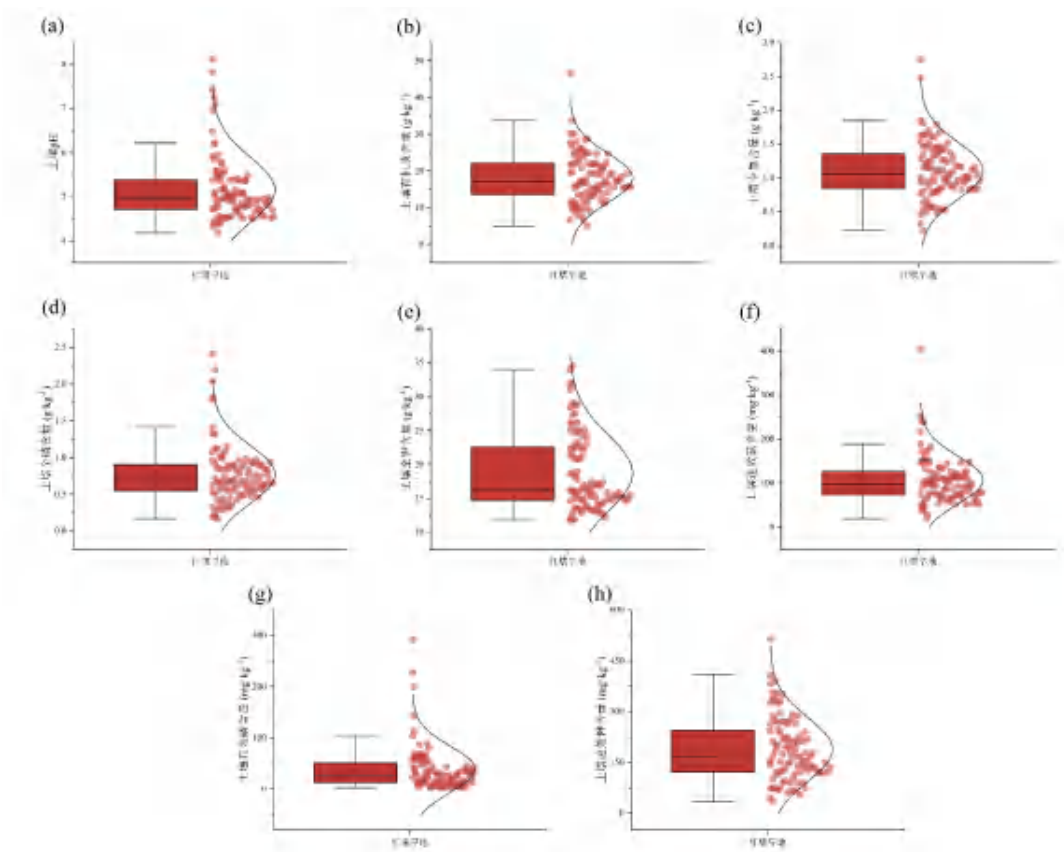


图 1-2 汨罗市域红壤旱地土壤化学指标

1.3 土壤生物指标描述性统计

汨罗市域红壤旱地土壤微生物群落 α 多样性结果显示,

Shannon 多样性指数均值为 7.49，变异系数为 6.41%（图 1-3(a)）；Inv_Simpson 多样性指数均值达 571.41，变异系数为 59.34%（图 1-3(b)）。群落均匀度方面，Pielou 均匀度指数均值为 0.86，变异系数为 4.45%（图 1-3(c)）；Simpson 均匀度指数均值为 0.09，变异系数为 46.48%（图 1-3(d)）。物种丰富度指标中，Richness 指数均值为 6309.27，变异系数为 19.11%（图 1-3(e)）；Chao1 指数均值为 9040.61，变异系数为 19.90%（图 1-3(f)）；ACE 丰富度指数均值 9458.66，变异系数为 19.99%（图 1-3(g)）。

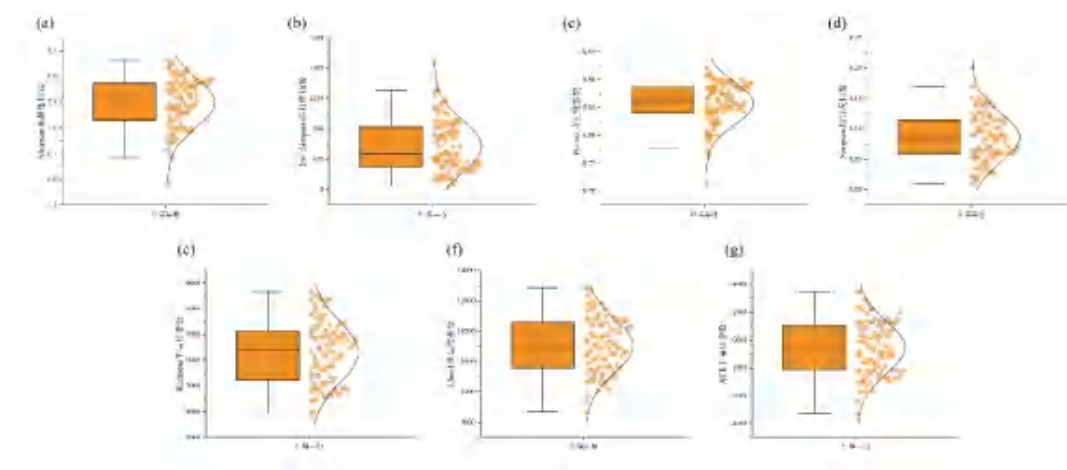


图 1-3 汨罗市域红壤旱地土壤微生物多样性指数

汨罗市域红壤旱地土壤微生物量碳含量均值为 149.27 mg/kg，分布范围是 35.89~349.55 mg/kg，变异系数为 47.99%（图 1-4(a)）；土壤微生物量氮含量均值为 12.43 mg/kg，分布范围是 2.31~32.02 mg/kg，其变异系数为 45.88%（图 1-4(b)）。汨罗市域红壤旱地土壤酶活性测定结果显示（图 1-5），脲酶活性均值为 576.12 $\mu\text{g/g} \cdot 24\text{h}$ 、酸性磷酸酶活性均值为 15.49 $\mu\text{mol/g} \cdot 24\text{h}$ 、蔗糖酶活性均值为 4.74 mg/g $\cdot 24\text{h}$ ，变异系数分别为 42.46%、28.11%和 32.69%。

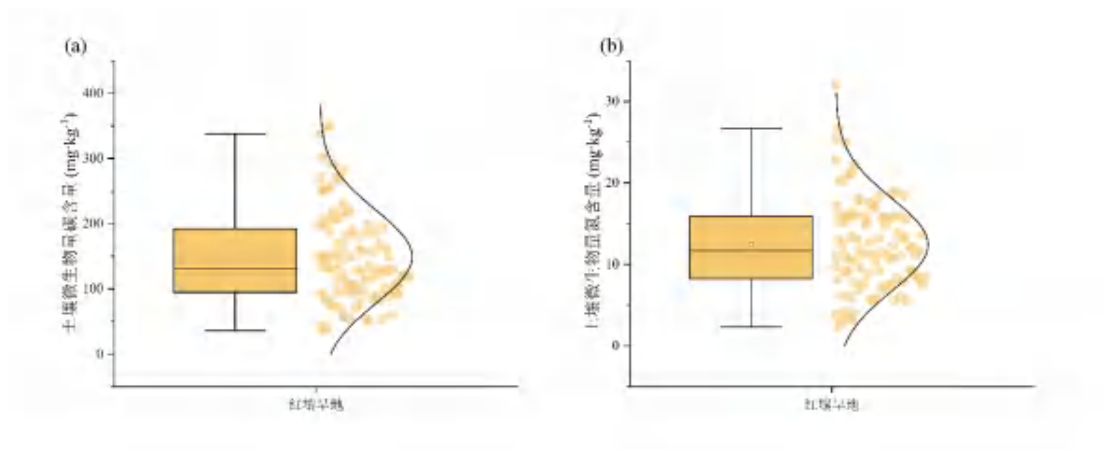


图 1-4 汨罗市域红壤旱地土壤微生物量碳、氮含量

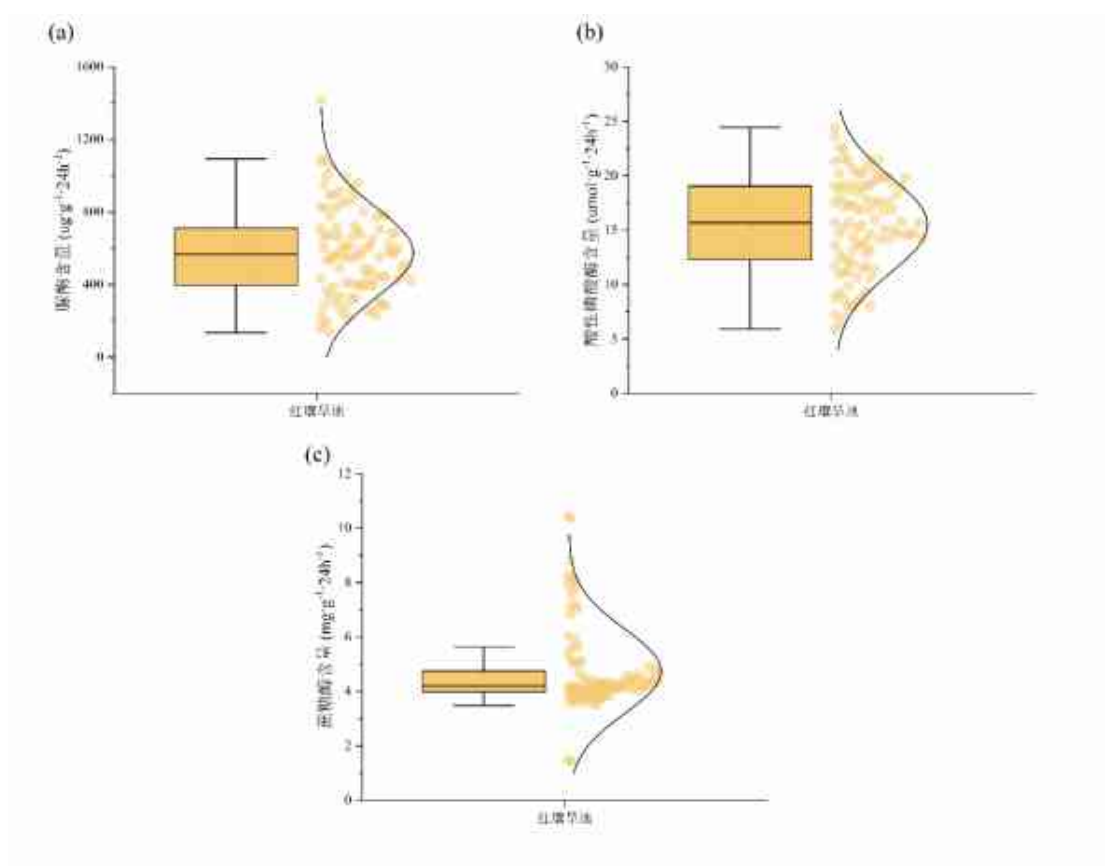


图 1-5 汨罗市域红壤旱地土壤碳、氮、磷循环代表性酶活性

1.4 土壤污染指数描述性统计

汨罗市域红壤旱地土壤污染指数平均值为 **0.25**, 最大值为 **0.33**, 不超过 **0.7** 限值, 变异系数为 **8.70%** (图 1-6)。

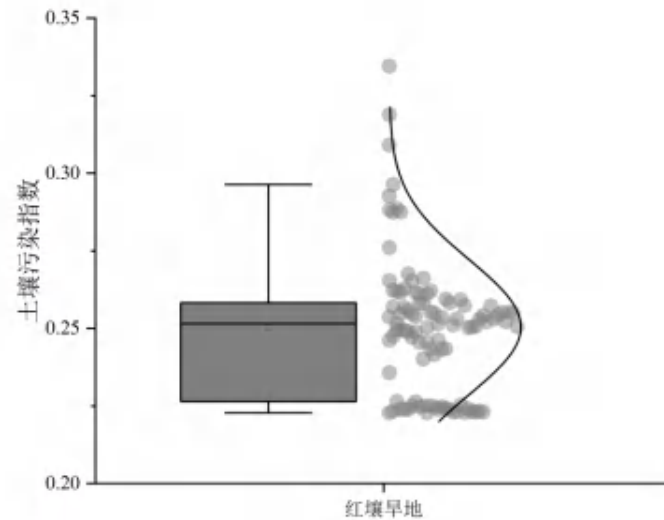


图 1-6 汨罗市域红壤旱地土壤污染指数

2 南方红壤旱地研究试点定位试验土壤指标的变化特征

2.1 不同管理措施下土壤物理指标的变化

在不同管理措施下，各处理红壤旱地的土壤容重无显著差异，但在数值上存在一定的差异，其中 **CK** 处理的土壤容重最高为 $1.28 \pm 0.017 \text{ g/cm}^3$ ，其次是 **F** 处理，其土壤容重为 $1.27 \pm 0.11 \text{ g/cm}^3$ ，施 **NPK** 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理 (**NPKS**) 下土壤容重最低为 $1.14 \pm 0.07 \text{ g/cm}^3$ (图 2-1)。

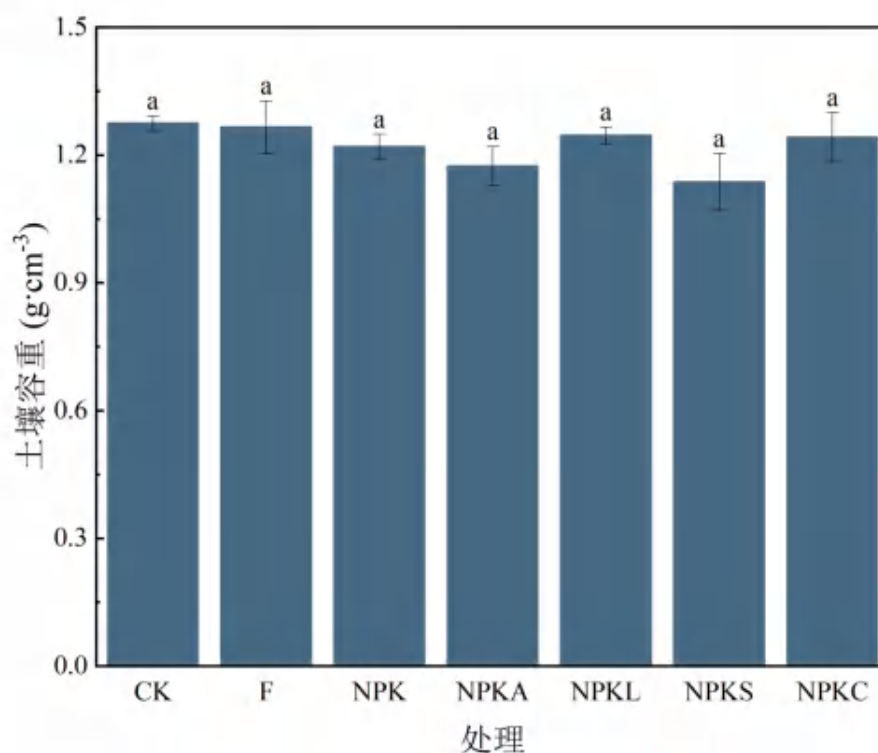


图 2-1 不同管理措施下土壤容重

注：CK，不施肥，种植作物；F，休闲；NPK，施 NPK 肥；NPKA，施 NPK 肥及骨粉有机肥；NPKL，施 NPK 肥及生石灰；NPKS，施 NPK 肥及小区内上季作物秸秆直接还田；NPKC，施 NPK 肥及生物有机肥。不同的小写字母表示不同处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

在不同管理措施下，施 NPK 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理（NPKS）的水稳性团聚体比例最高，为 44.94 ± 7.49 ，与 CK 处理相比增加了 15.95%，与 NPK 处理相比增加了 18.16%。施 NPK 肥及生石灰处理（NPKL）红壤旱地的土壤水稳性团聚体的比例为 22.81 ± 1.42 ，较 CK 处理显著降低了 39.61%，较 NPK 处理显著降低了 37.98% ($P < 0.05$)（图 2-2）。

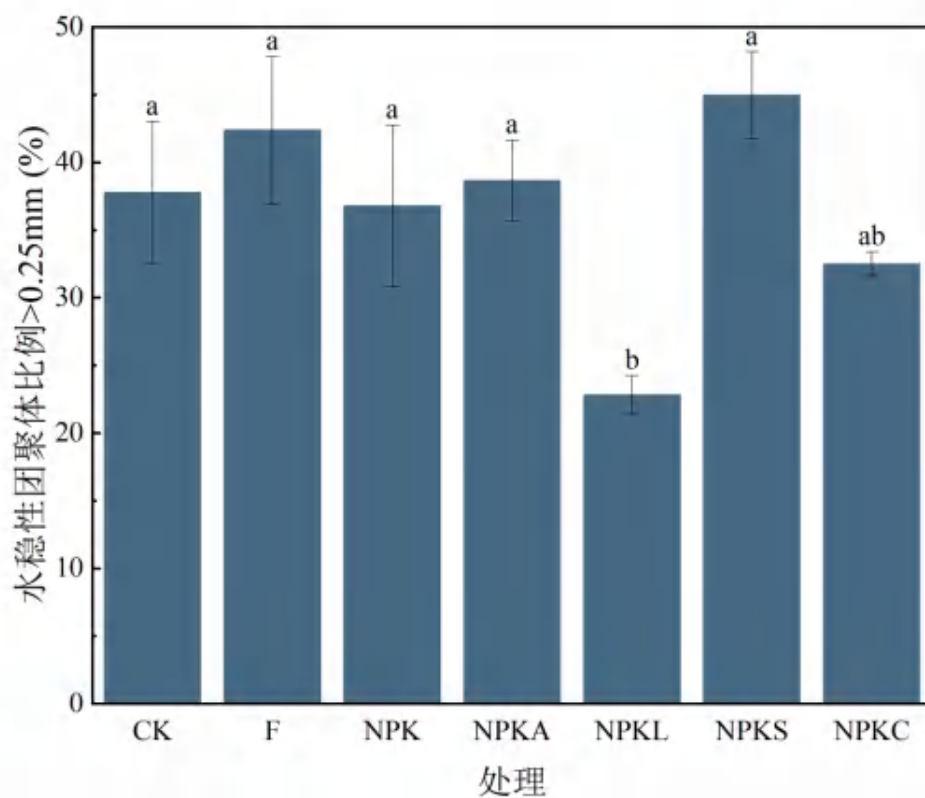


图 2-2 不同管理措施下土壤水稳性团聚体比例

在不同管理措施下，施 **NPK** 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理(**NPKS**)红壤旱地的土壤平均重量直径最大,为 0.79 ± 0.11 mm,较 **CK** 处理增加了 31.65%，较 **NPK** 处理增加了 38.57%。施 **NPK** 肥及生石灰处理（**NPKL**）红壤旱地的土壤平均重量直径最小，为 0.33 ± 0.02 mm，较 **NPK** 处理增加了 36.54%（图 2-3）。

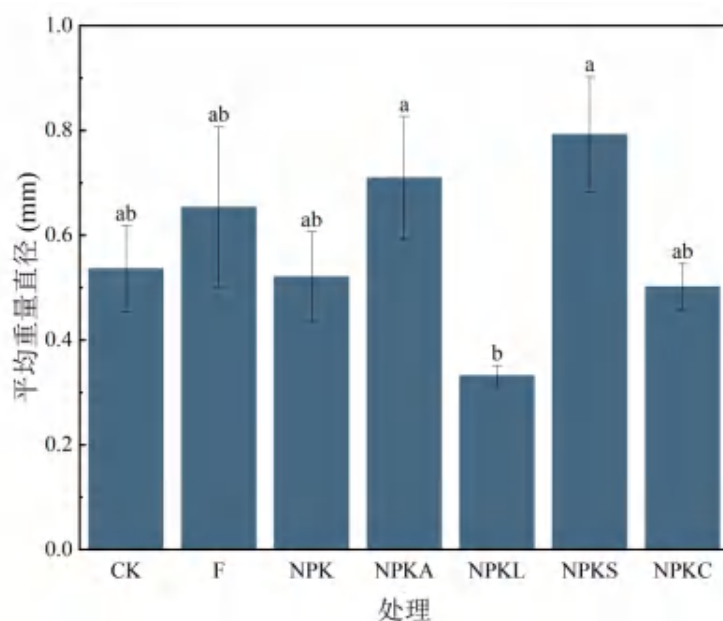


图 2-3 不同管理措施下土壤平均重量直径

在不同管理措施下，施 **NPK** 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理(**NPKS**)红壤旱地的土壤几何平均直径最大,为 0.22 ± 0.03 mm，较 **CK** 处理增加了 **22.73%**，较 **NPK** 处理增加了 **15.77%**。施 **NPK** 肥及生石灰处理 (**NPKL**)红壤旱地的土壤平均重量直径最高最低，为 0.08 ± 0.01 mm，较 **NPK** 处理增加了 **57.90%**（图 2-4）。

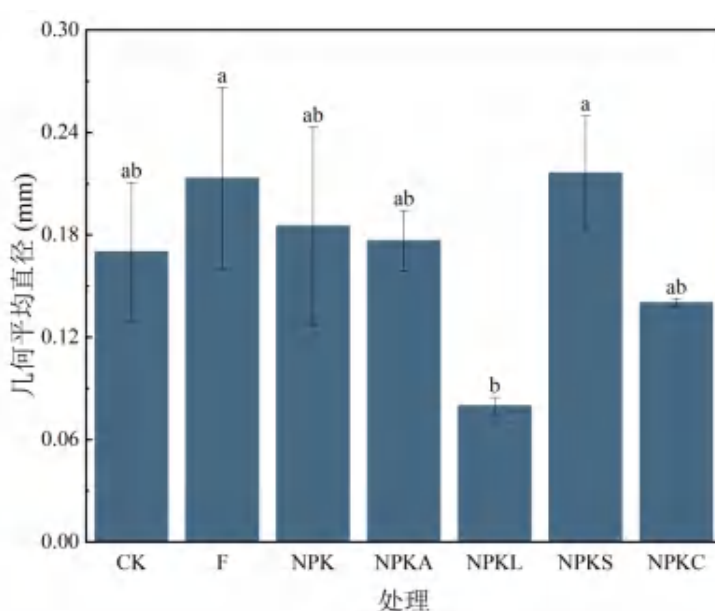


图 2-4 不同管理措施下土壤几何平均直径

在不同管理措施下，F 处理红壤旱地的土壤向量长度稳定性指数最高为 28.78 ± 0.030 ，其次是施 NPK 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理（NPKS），其土壤向量稳定性指数为 28.74 ± 0.04 。施 NPK 肥及生石灰处理（NPKL）红壤旱地的土壤向量长度稳定性指数为 0.16，显著小于其他处理（ $P < 0.05$ ）（图 2-5）。

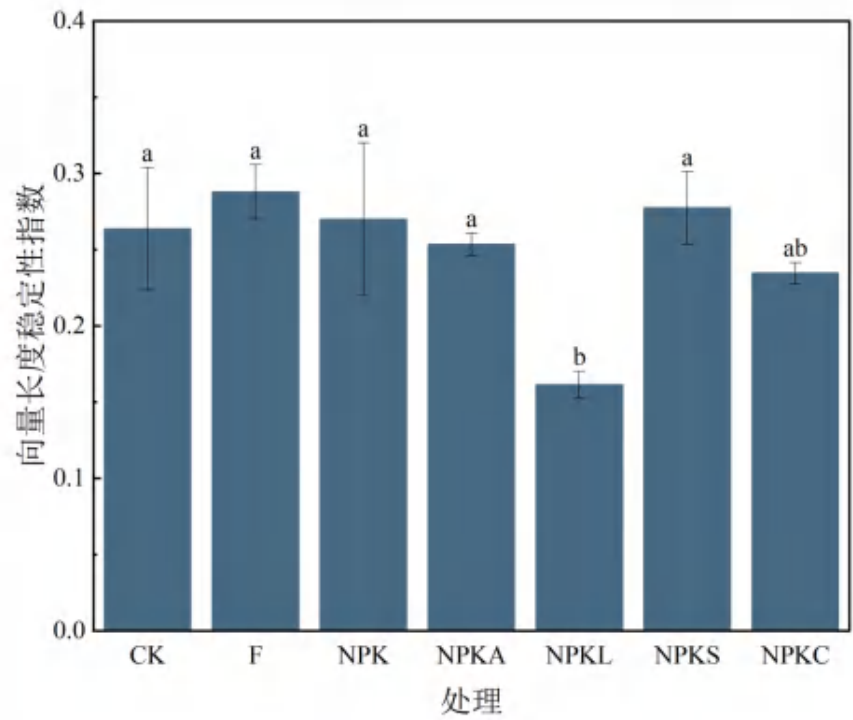


图 2-5 不同管理措施下土壤向量长度稳定性指数

2.2 不同管理措施下土壤化学指标的变化

在不同管理措施下，施 NPK 肥及生石灰处理（NPKL）的土壤 pH 值为 8.05 ± 0.06 ，呈弱碱性。CK 与 F 处理的土壤 pH 值分别为 5.55 ± 0.17 、 5.85 ± 0.29 ，呈弱酸性。NPK、NPKA、NPKS、NPKC 处理土壤 pH 值范围在 4.5-5.5 之间，呈强酸性（图 2-6）。

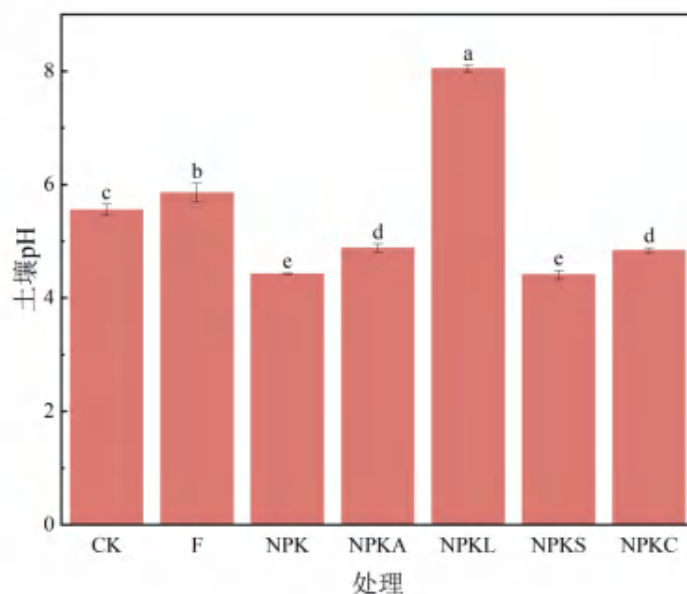


图 2-6 不同管理措施下土壤 pH

在不同管理措施下，施 NPK 肥及生物有机肥处理（NPKC）红壤旱地的土壤有机质含量最高，为 $25.84 \pm 2.12 \text{ g/kg}$ ，与 CK 处理相比，显著增加了 62.62%，与 NPK 处理相比，显著增加了 39.67%。施 NPK 肥及骨粉有机肥处理（NPKA）的有机质含量为 $22.24 \pm 2.64 \text{ g/kg}$ ，与 CK 处理相比，显著增加了 56.56%，与 NPK 处理相比，显著增加了 29.90%（图 2-7）。

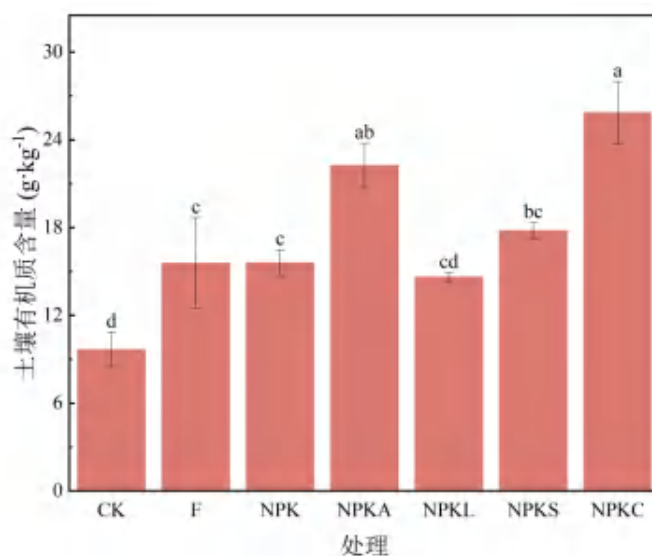


图 2-7 不同管理措施下土壤有机质含量

在不同管理措施下，施 NPK 肥及生物有机肥处理（NPKC）和施 NPK 肥及骨粉有机肥处理（NPKA）的土壤全氮含量分别为 1.68 ± 0.15 g/kg 和 1.49 ± 0.13 g/kg，显著高于 CK 与 NPK 处理组（ $P < 0.05$ ），与 CK 处理相比，NPKC 处理的土壤全氮含量增加了 58.93%，NPKA 处理的土壤全氮含量增加了 53.70%。与 NPK 处理相比，NPKC 处理的土壤全氮含量增加了 38.69%，NPKA 处理的土壤全氮含量增加了 30.87%（图 2-8）。

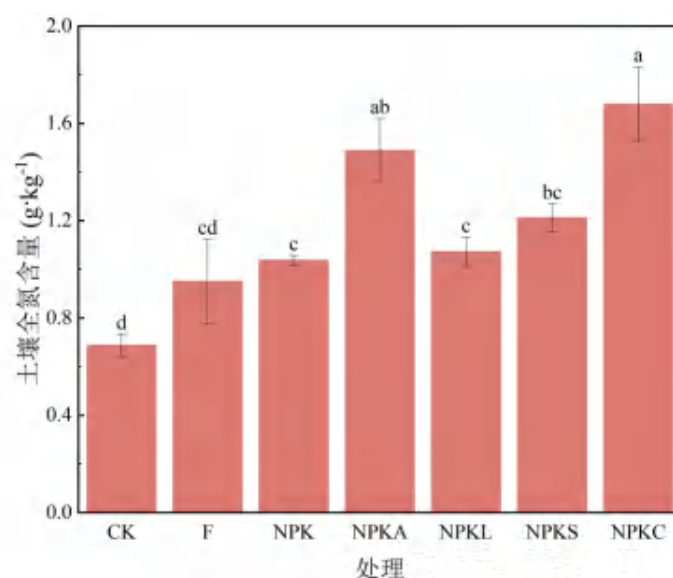


图 2-8 不同管理措施下土壤全氮含量

在不同管理措施下，施 NPK 肥及生物有机肥处理（NPKC）和施 NPK 肥及骨粉有机肥处理（NPKA）的土壤全磷含量分别为 0.98 ± 0.16 和 0.84 ± 0.08 g/kg，显著高于 CK 与 NPK 处理组（ $P < 0.05$ ），与 CK 处理相比，NPKC 处理的土壤全氮含量增加了 66.33%，NPKA 处理的土壤全氮含量增加了 60.71%。与 NPK 处理相比，NPKC 处理的土壤全氮含量增加了 41.84%，NPKA 处理的土壤全氮含量增加了 32.14%（图 2-9）。

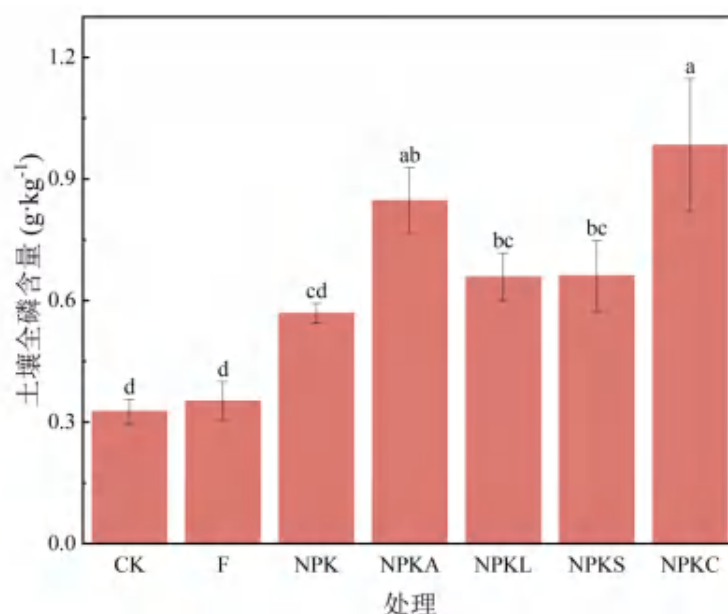


图 2-9 不同管理措施下土壤全磷含量

在不同管理措施下，施 **NPK** 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理（**NPKS**）的土壤全钾含量为 $15.15 \pm 0.52 \text{ g/kg}$ ，与 **CK** 相比，显著降低了 **8.57%**，与 **NPK** 相比，显著降低了 **9.61%** ($P < 0.05$)。施 **NPK** 肥及生物有机肥处理（**NPKC**）的土壤全钾含量为 $15.08 \pm 0.52 \text{ g/kg}$ ，与 **CK** 相比，显著降低了 **4.65%**，与 **NPK** 相比，显著降低了 **10.02%** ($P < 0.05$)（图 2-10）。

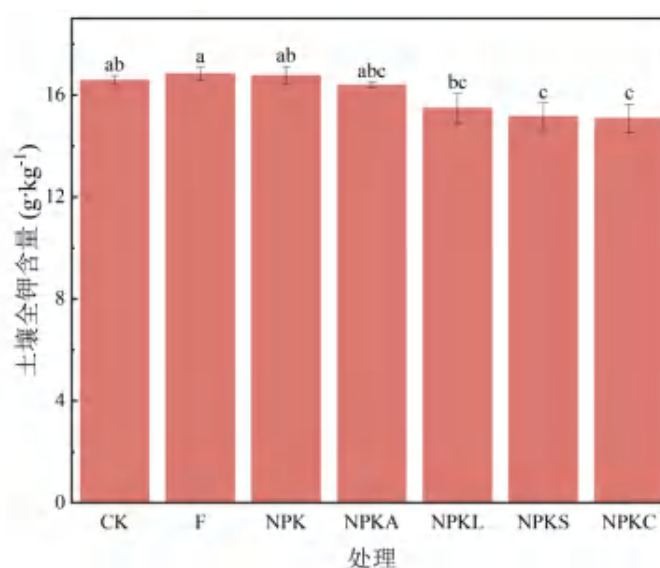


图 2-10 不同管理措施下土壤全钾含量

在不同管理措施下，施 NPK 肥及生物有机肥处理（NPKC）、施 NPK 肥及骨粉有机肥处理（NPKA）和施 NPK 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理（NPKS）的土壤速效氮含量分别为 142.58 ± 9.72 、 132.23 ± 22.33 和 130.93 ± 15.51 mg/kg，均显著高于其他处理组（ $P < 0.05$ ）。与 CK 处理相比，NPKC、NPKA 和 NPKS 处理分别增加了 65.54%、62.84%、62.48%。与 NPK 处理相比，NPKC、NPKA 和 NPKS 处理分别增加了 37.41%、32.51%、31.84%（图 2-11）。

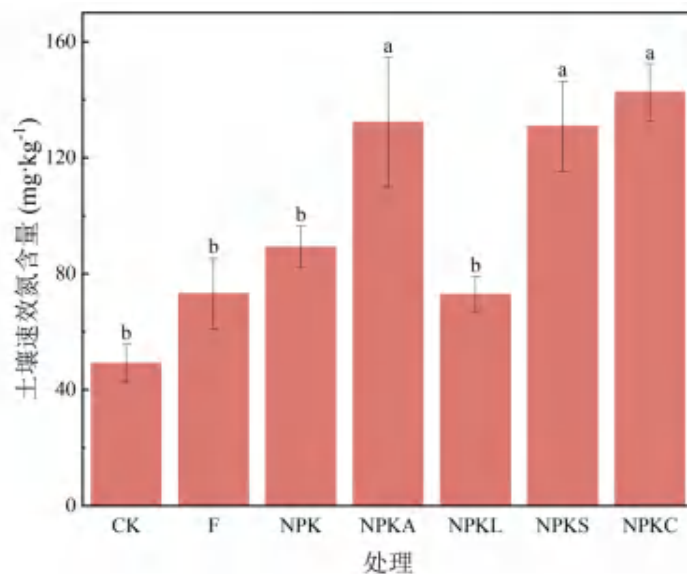


图 2-11 不同管理措施下土壤速效氮含量

在不同管理措施下，施 NPK 肥及生物有机肥处理（NPKC）、施 NPK 肥及骨粉有机肥处理（NPKA）和施 NPK 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理（NPKS）的土壤有效磷含量分别为 40.92 ± 2.20 、 36.40 ± 1.30 和 22.96 ± 6.40 mg/kg，显著高于其他处理组（ $P < 0.05$ ）。与 CK 处理相比，NPKC、NPKA 和 NPKS 处理分别增加了 91.00%、89.90%、83.71%。与 NPK 处理相比，NPKC、NPKA 和 NPKS 处理分别增加了 60.48%、55.58%、29.57%（图 2-12）。

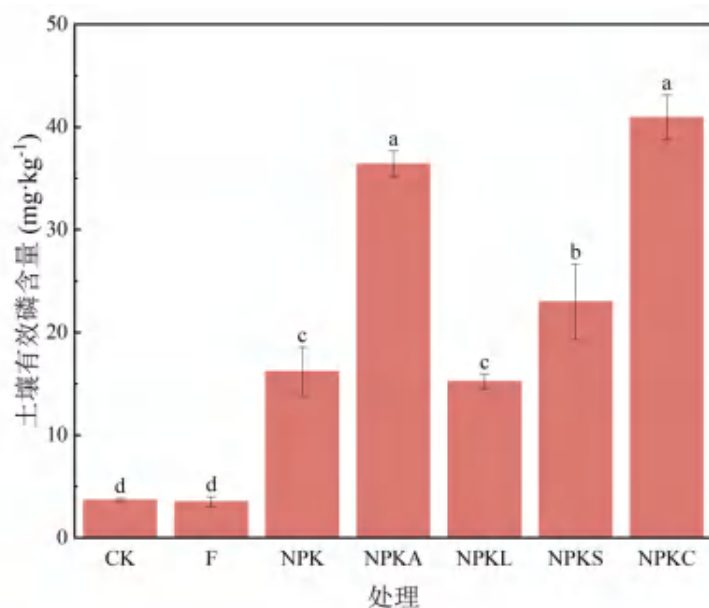


图 2-12 不同管理措施下土壤有效磷含量

在不同管理措施下，F 处理组速效钾含量为 273.26 ± 56.58 mg/kg，显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)，其他处理组间无明显差异 (图 2-13)。

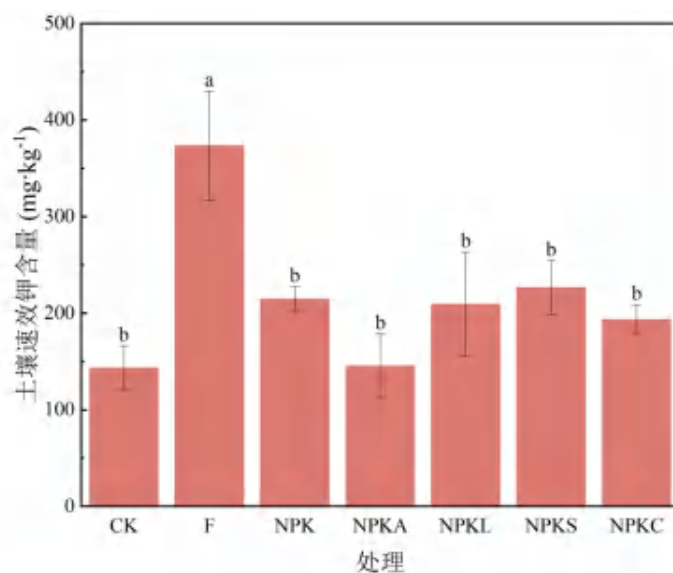


图 2-13 不同管理措施下土壤速效钾含量

2.3 不同管理措施下土壤生物指标的变化

在不同管理措施下，F 处理的土壤 Shannon 多样性指数最高为 8.02 ± 0.07 ，施 NPK 肥及生石灰处理 (NPKL) 的，为 7.82 ± 0.13 ，

施 NPK 肥及生物有机肥处理（NPKC）的土壤 Shannon 多样性指数最低为 6.68 ± 0.09 （图 2-14）。

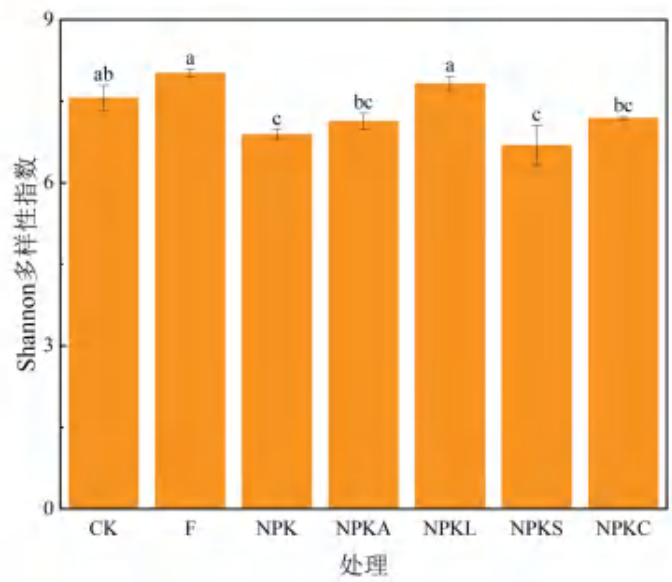


图 2-14 不同管理措施下土壤 Shannon 多样性指数

在不同管理措施下，F 处理组土壤 Inv_Simpson 多样性指数最高为 942.28 ± 110.94 ，施 NPK 肥及生物有机肥处理（NPKC）的土壤 Inv_Simpson 多样性指数最低为 294.62 ± 39.85 （图 2-15）。

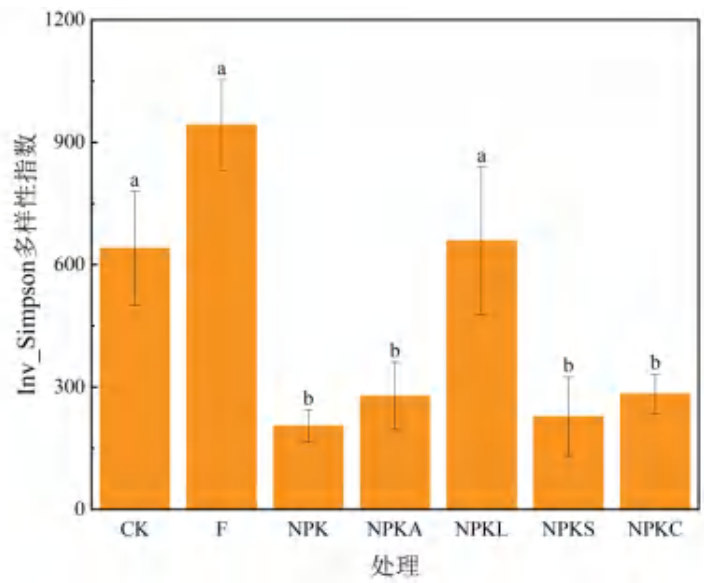


图 2-15 不同管理措施下土壤 Inv_Simpson 多样性指数

在不同管理措施下，F 处理组土壤 Pielou 均匀度指数最高为 0.89

±0.01，施 NPK 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理（NPKS）的土壤 Pielou 均匀度指数最低为 0.79 ± 0.04 （图 2-16）。

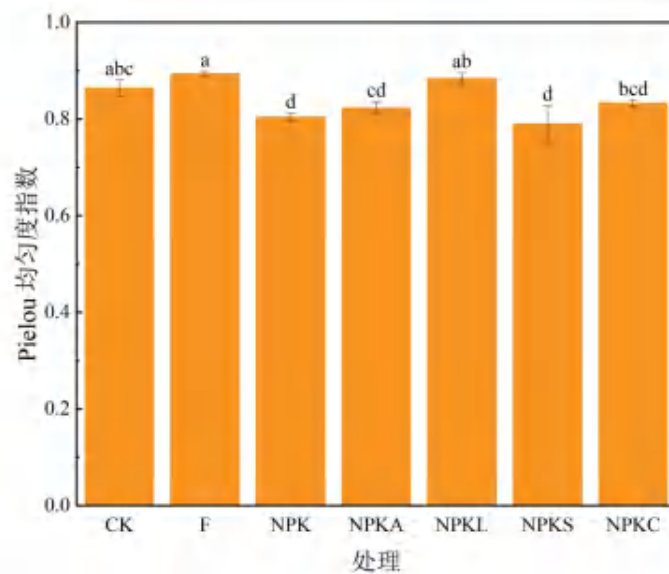


图 2-16 不同管理措施下土壤 Pielou 均匀度指数

在不同管理措施下，F 处理组土壤 Simpson 均匀度指数最高为 0.12 ± 0.01 ，NPK 处理组土壤 Simpson 均匀度指数最低为 0.04 ± 0.01 （图 2-17）。

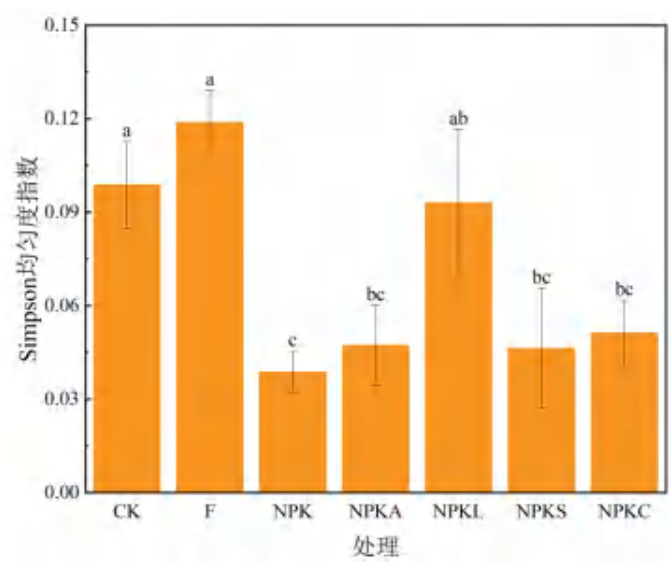


图 2-17 不同管理措施下土壤 Simpson 均匀度指数

在不同管理措施下，F 处理组土壤 Richuness 均匀度指数最高为

7888.00±236.09，施 NPK 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理（NPKS）的土壤 Richness 均匀度指数最低为 4730.00±317.09（图 2-18）。

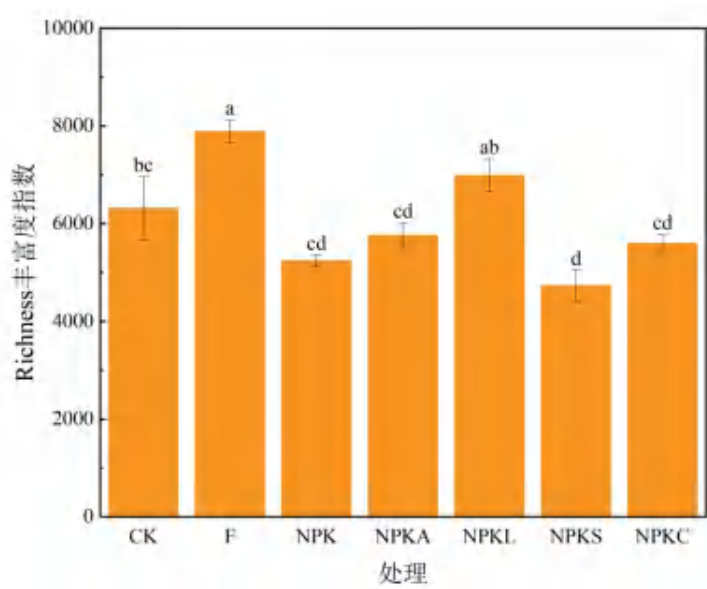


图 2-18 不同管理措施下土壤 Richness 丰富度指数

在不同管理措施下，F 处理组土壤 Chao1 丰富度指数最高为 11408.20±463.88，施 NPK 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理（NPKS）的土壤 Chao1 丰富度指数最低为 6931.38±686.73（图 2-19）。

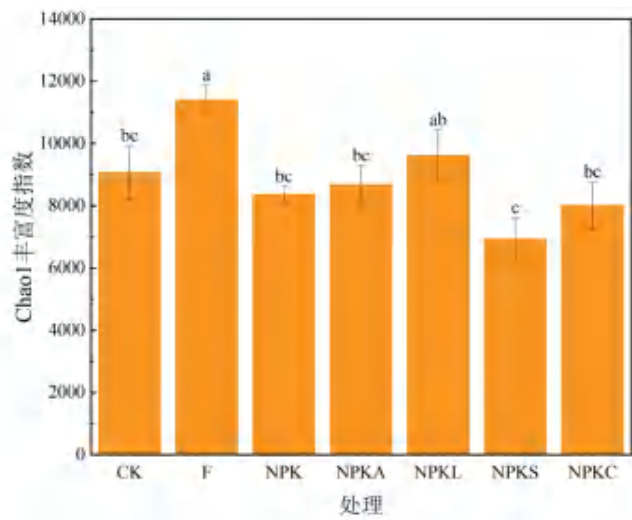


图 2-19 不同管理措施下土壤 Chao1 丰富度指数

在不同管理措施下，F 处理组土壤 ACE 丰富度指数最高为 11928.03 ± 551.74 ，施 NPK 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理 (NPKS) 的土壤 ACE 丰富度指数最低为 7370.42 ± 794.75 (图 2-20)。

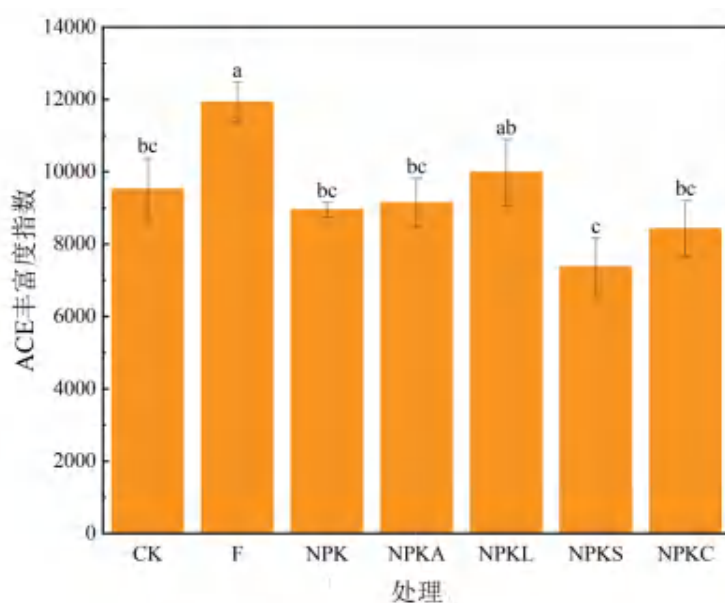


图 2-20 不同管理措施下土壤 ACE 丰富度指数

在不同管理措施下，施 NPK 肥及生石灰处理 (NPKL) 的土壤微生物碳含量最高为 254.01 ± 19.69 mg/kg，CK 处理组土壤微生物量最低为 160.54 ± 21.07 mg/kg (图 2-21)。

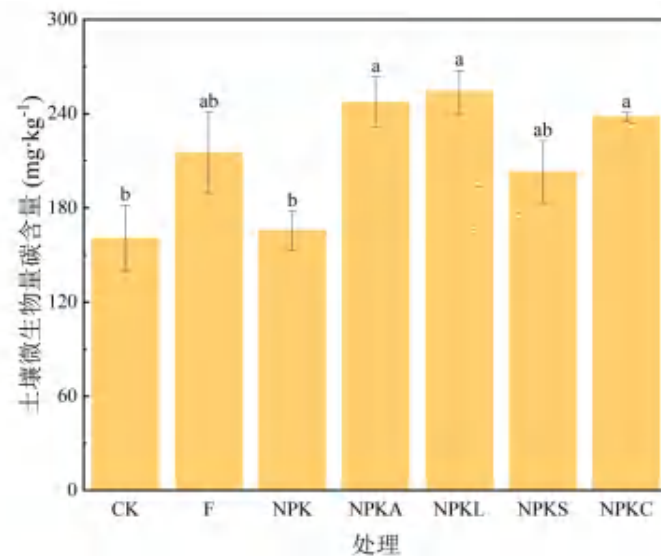


图 2-21 不同管理措施下土壤微生物量碳含量

在不同管理措施下，施 **NPK** 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理 (**NPKS**) 的土壤微生物碳含量最高为 $21.81 \pm 1.43 \text{ mg/kg}$, **CK** 处理组土壤微生物量最低为 $6.68 \pm 0.79 \text{ mg/kg}$ (图 2-22)。

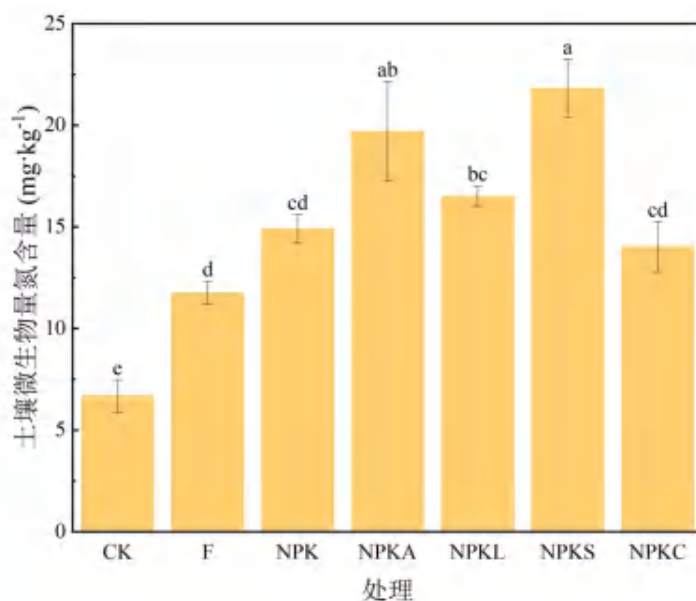


图 2-22 不同管理措施下土壤微生物量氮含量

在不同管理措施下，施 **NPK** 肥及生物有机肥处理 (**NPKC**) 的土壤脲酶活性最高为 $1140.97 \pm 213.72 \text{ } \mu\text{g} \cdot / \text{g} \cdot 24\text{h}$, **CK** 处理组土壤脲酶活性最低为 $300.75 \pm 75.11 \text{ } \mu\text{g/g} \cdot 24\text{h}$ (图 2-23)。

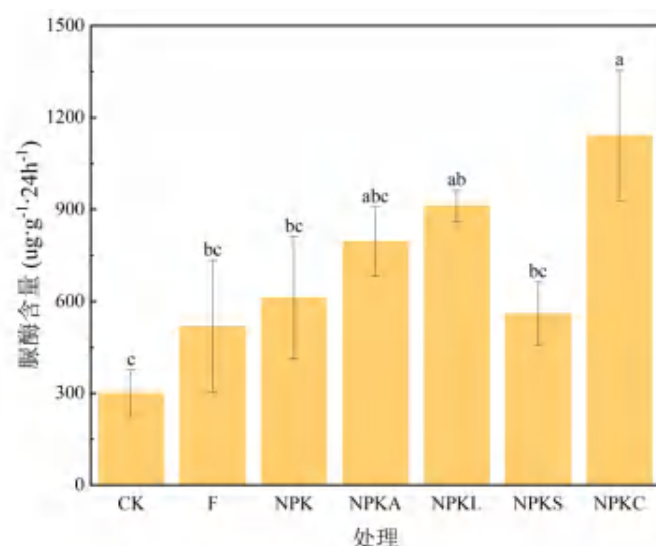


图 2-23 不同管理措施下土壤脲酶活性

在不同管理措施下，F 处理组土壤酸性磷酸酶活性最高为 $23.43 \pm 3.70 \mu\text{mol/g} \cdot 24\text{h}$ ，施 NPK 肥及生石灰处理（NPKL）的理组土壤脲酶活性最低为 $11.46 \pm 0.44 \mu\text{mol/g} \cdot 24\text{h}$ （图 2-24）。

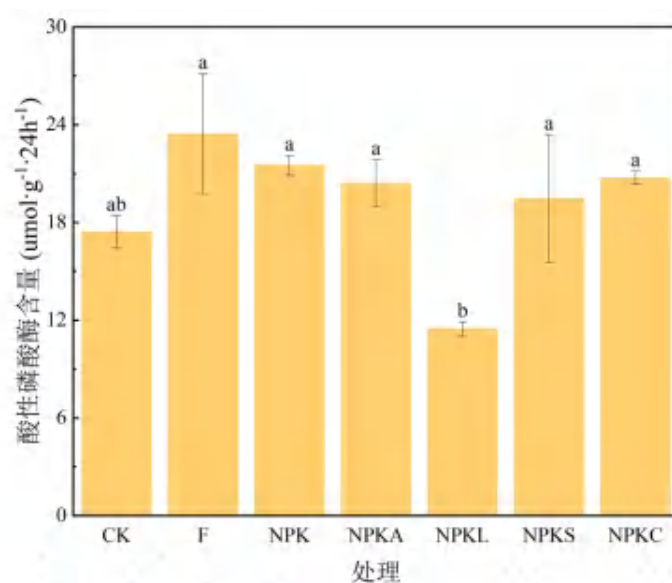


图 2-24 不同管理措施下土壤酸性磷酸酶活性

在不同管理措施下，施 NPK 肥及骨粉有机肥处理（NPKA）的土壤蔗糖酶活性最高为 $20.97 \pm 11.67 \text{mg/g} \cdot 24\text{h}$ ，CK 处理组土壤脲酶活性最低为 $4.42 \pm 0.42 \text{mg/g} \cdot 24\text{h}$ （图 2-25）。

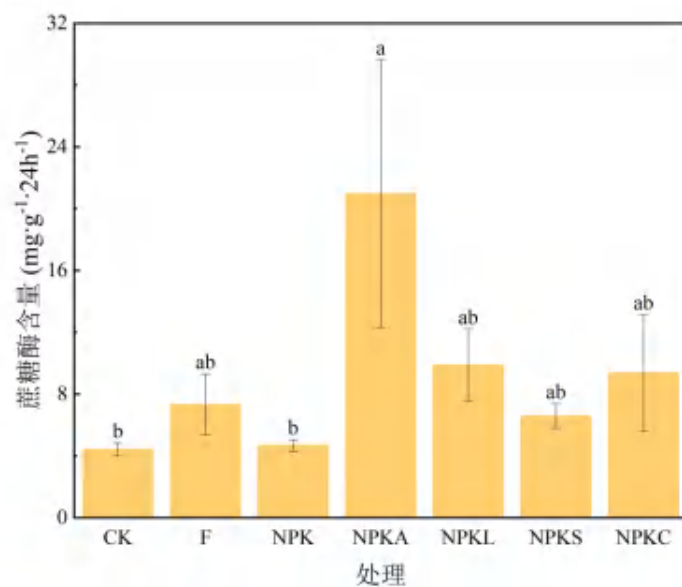


图 2-25 不同管理措施下土壤蔗糖酶活性

2.4 不同管理措施下土壤污染指数的变化

在不同管理措施下，F 处理组污染指数最高为 0.19，施 NPK 肥及小区内上季作物秸秆直接还田处理（NPKS）的土壤污染指数最低为 0.18（图 2-26）。

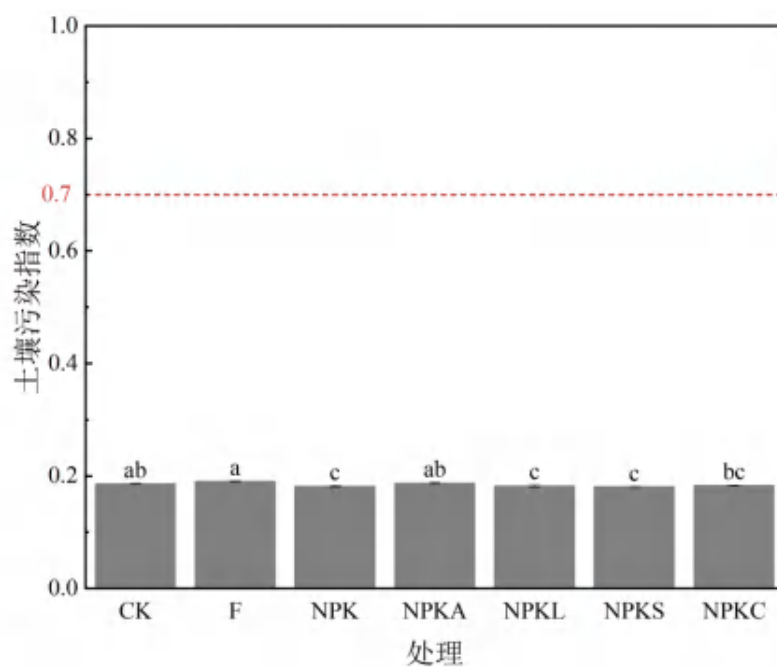


图 2-26 不同管理措施下土壤污染指数

3 土壤健康指数

3.1 汨罗市域土壤健康指数

基于湖南汨罗市域调查，共采集 **100** 份土壤样品，测定并计算 **25** 项土壤物理、化学、生物指标。通过主成分分析以及相关性分析并结合已有研究基础，最终确定纳入评价体系的指标为：土壤容重、几何平均直径、土壤 pH、有机质、全磷、全钾、速效氮、有效磷、速效钾、**Richness** 丰富度指数、微生物量碳、微生物量氮、脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶。依据以上指标进而进行土壤健康状况评价。

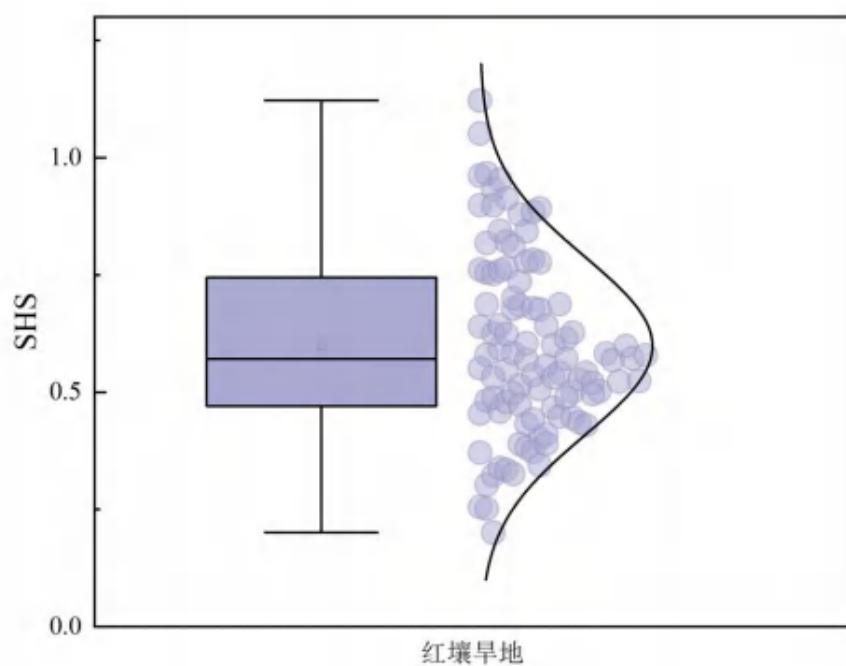


图 3-1 汨罗市域土壤健康指数

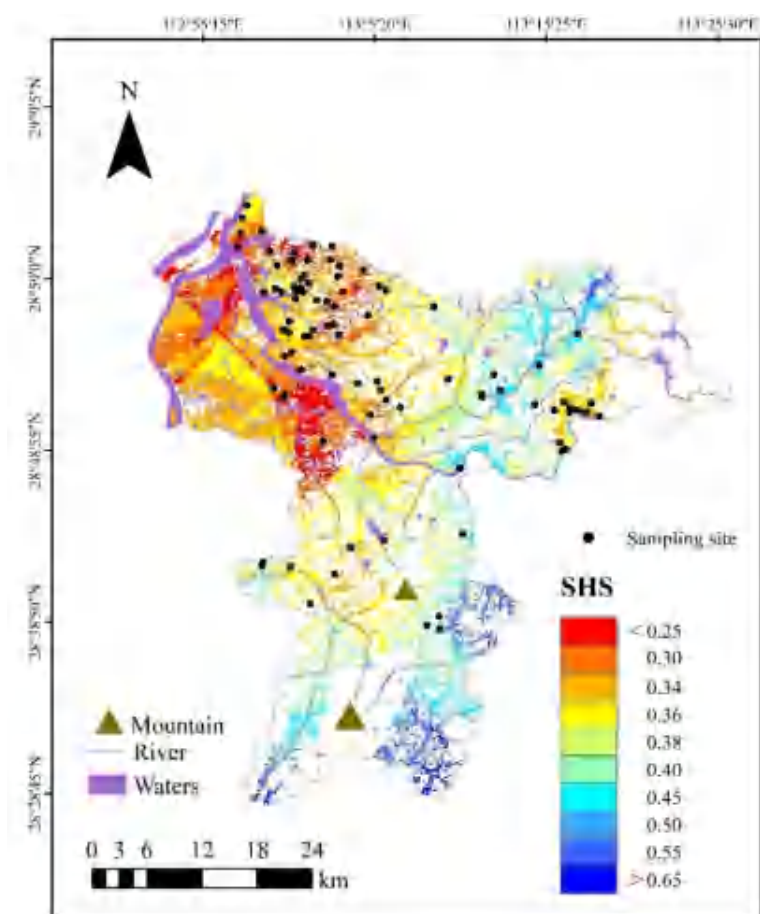


图 3-2 汨罗市域土壤健康指数空间分布图

基于几何平均数结合高斯拟合与波兹曼拟合,对县域土壤健康指数频率分布进行分析,进而得出不同土壤健康等级,等级 1~3 的土壤占比 9%、等级 4~6 的土壤占比 65%、等级 7~9 的土壤占比 26%。

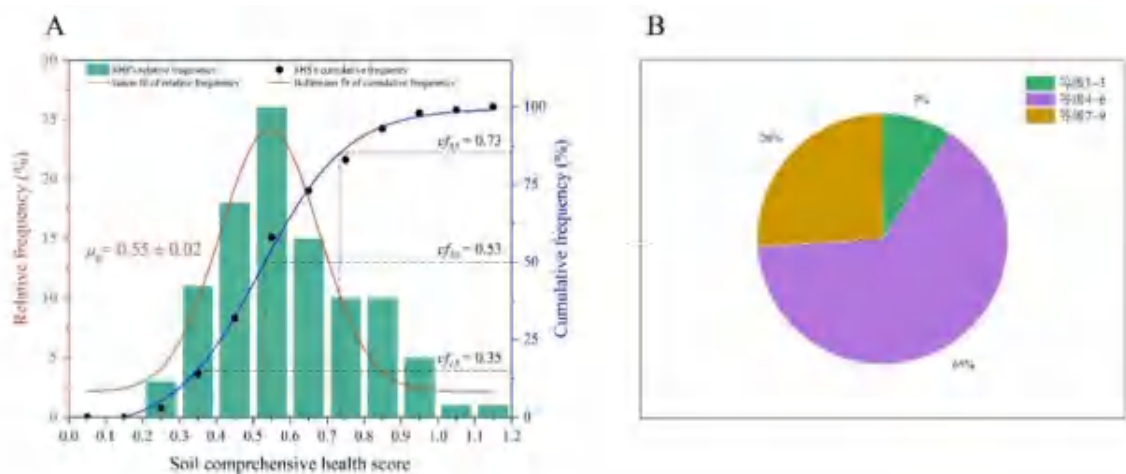


图 3-3 汨罗市域土壤健康指数频率分布 (A) 及健康等级占比 (B)

根据随机森林 **RandomForest** 模型特征重要值排序的方法，我们得出对于南方红壤旱地县域土壤来说，驱动土壤健康指数变化的关键因素是微生物量氮(**MBN**)，其次是微生物量碳(**MBC**)、有机质(**SOM**)、有效磷 (**AP**)、全磷 (**TP**) 和 **pH** 值。

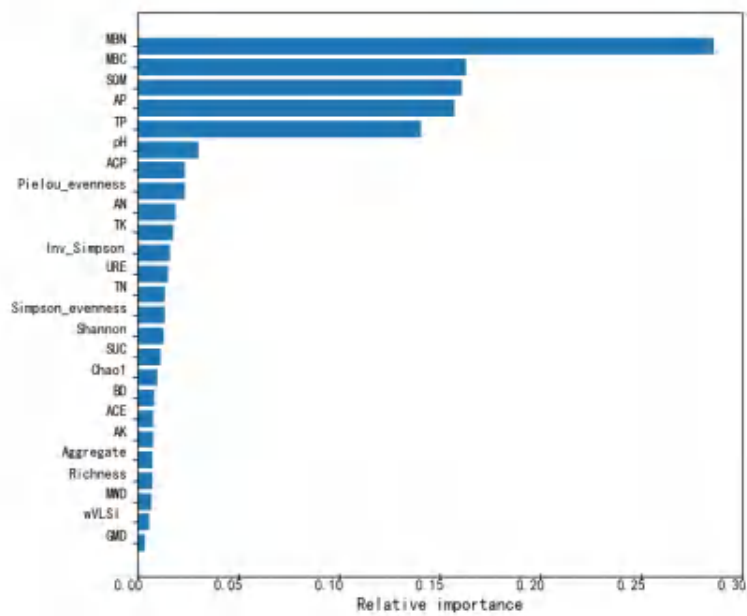


图 3-4 汨罗市域红壤旱地土壤健康指数随机森林特征重要性排序

3.2 岳阳定位试验土壤健康指数

基于湖南岳阳低产红壤旱地改良定位试验，共采集 **21** 份土壤样品，测定并计算 **25** 项土壤物理、化学、生物指标。通过主成分分析以及相关性分析并结合已有研究基础，最终确定纳入评价体系的指标为：土壤容重、几何平均直径、土壤 **pH**、有机质、全钾、速效钾、**Richness** 丰富度指数、微生物量碳、微生物量氮、脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶。依据以上指标进而进行土壤健康状况评价。

与只施 **NPK** 肥相比，骨粉有机肥、生石灰、生物有机肥的添加使用分别使土壤健康指数显著提高 **58.57%**、**98.62%**、**67.09%**。根据

随机森林模型，影响土壤健康指数变化的关键因素是微生物生物量碳（MBC），其次是蔗糖酶（SUC）、Shannon 多样性指数和平均重量直径（MWD）。

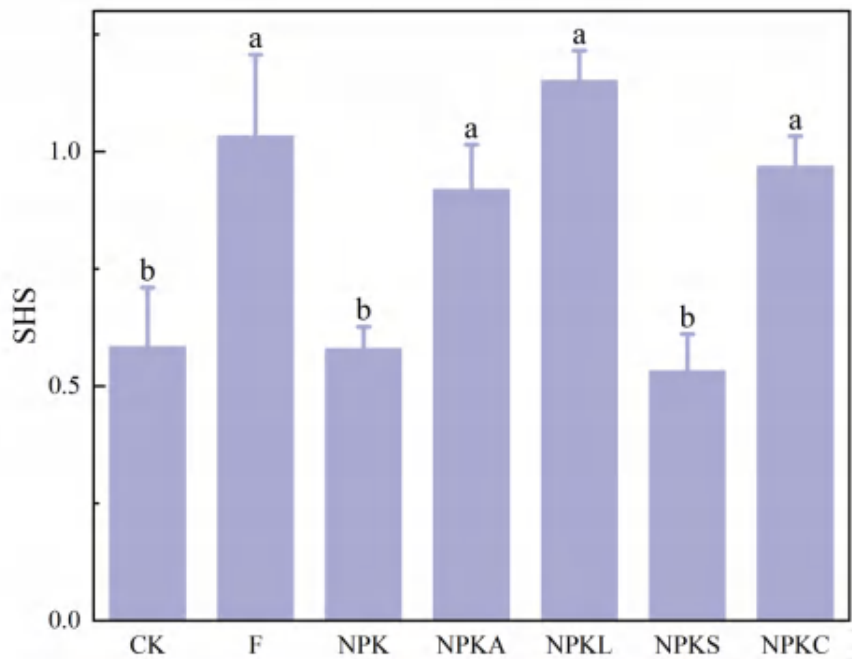


图 3-5 岳阳红壤旱地土壤健康指数

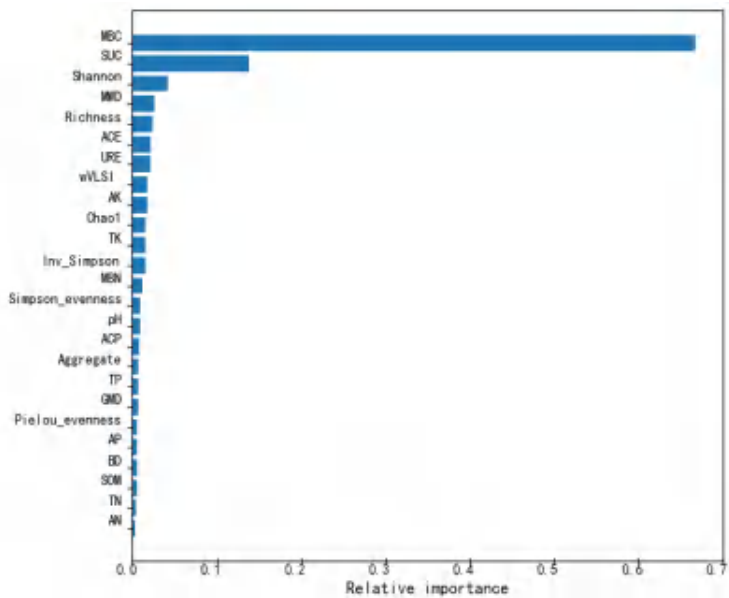


图 3-6 岳阳红壤旱地土壤健康指数随机森林特征重要性占比

4 作物健康指数

本文件最终确定纳入评价体系的指标为：淀粉、蛋白质、赖氨酸、脂肪、油酸氨基酸。依据以上指标进而进行作物健康状况评价。

4.1 玉米健康评价

玉米的淀粉含量为 $36.11\% \pm 4.59$ ，赖氨酸含量为 $56.80\% \pm 11.66$ ，蛋白质含量为 $56.65\% \pm 4.65$ ，品质指数为 0.49 ± 0.48 ，健康综合分值为 0.62 ± 0.23 （图 4-1）。

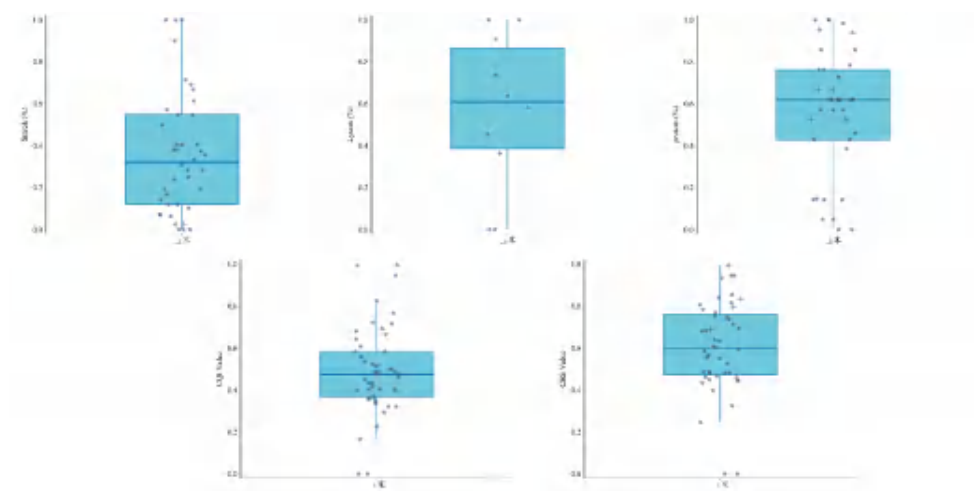


图 4-1 玉米不同健康指标数值概况

4.2 花生健康评价

花生的蛋白质含量为 $45.95\% \pm 4.51$ ，脂肪含量为 $62.66\% \pm 4.12$ ，油酸含量 $55.65\% \pm 4.51$ ，品质指数为 0.48 ± 0.18 ，健康综合分值为 0.68 ± 0.05 （图 4-2）。

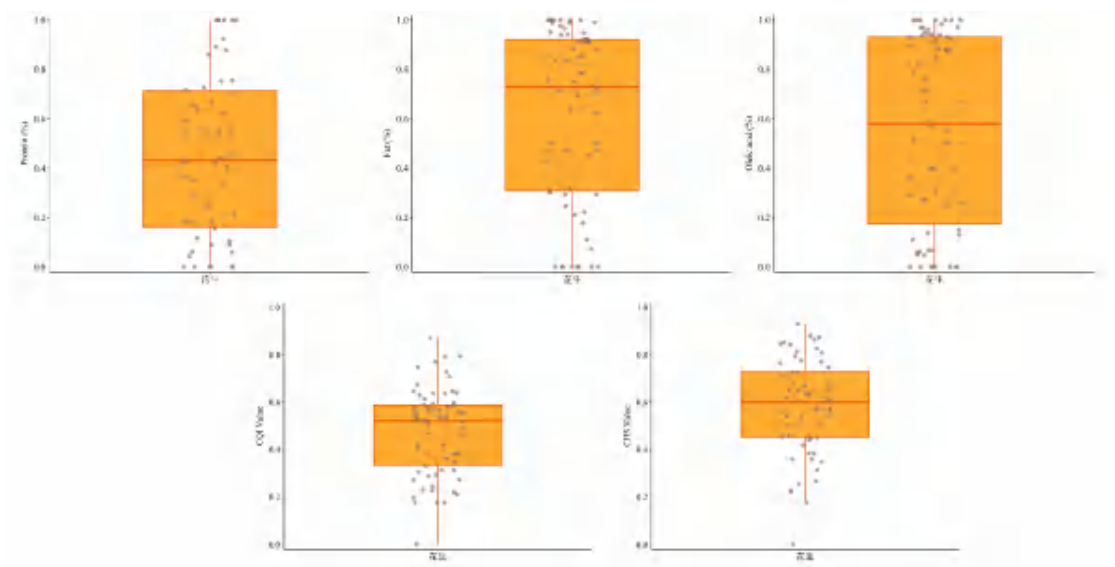


图 4-2 花生不同健康指标数值概况

4.3 油菜健康综合评价

油菜的蛋白质含量为 $40.77\% \pm 18.18$ ，油酸含量为 $68.66\% \pm 18.82$ ，品质指数为 0.56 ± 0.10 ，健康综合分值 0.60 ± 0.18 (图 4-3)。

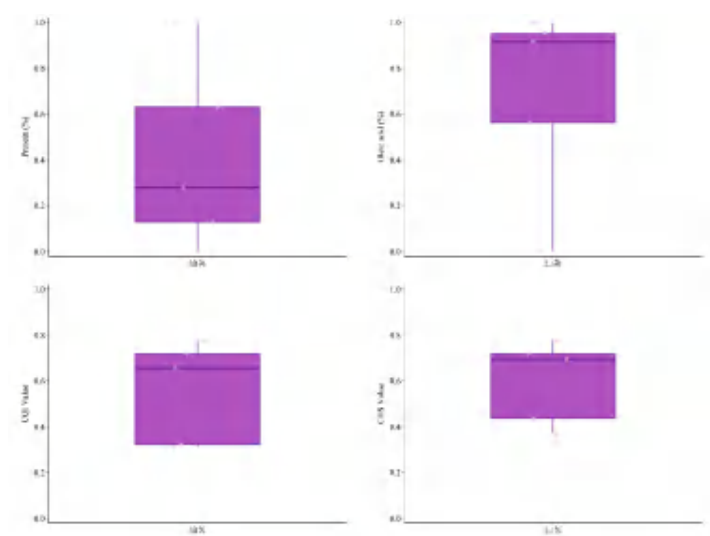


图 4-3 油菜不同健康指标数值概况

5 土壤健康指数的应用

土壤是耕地的重要载体，是农田生态系统的基础，土壤健康状况直接影响着人类生产、生活和生态系统的完整性与健康水平。从土壤肥力到土壤质量再到土壤健康，土壤作为一个充满生命的生态系统逐

渐成为研究的热点。联合国粮农组织(FAO)土壤跨政府技术小组(ITPS)定义土壤健康为“土壤持续保持陆地生态系统生产力、生物多样性和环境服务的能力”，土壤健康测试结果的有效利用需要具体的解释框架，本研究选择土壤管理评估框架(Soil Management Assessment Framework, SMAF)，并引入机器学习新方法进行土壤健康指数的量化。以表征耕地土壤功能为核心，构建耕地土壤健康全流程评价框架，从应用角度划分出田块、县域、省域和国家的 4 级尺度，县域尺度耕地评价的结果能为农业实际生产、耕地改良和耕地保护提供具体指导和依据，因此进行县域尺度耕地健康评估研究是十分必要的。我国红壤区面积大，是中国南方丘陵区主要的耕地资源，有巨大的生产与资源潜力。据统计，我国酸化土壤的面积达 2 亿公顷。南方红黄壤区土壤酸化加剧、生态功能下降、养分不平衡、污染物风险增加等问题日趋严峻，亟需提升我国典型耕地土壤健康水平，实现粮油产能与生态保护的协调发展。近年来随着田间管理和农耕制度不断完善，中国红壤区土壤状况发生明显变化，然而现阶段其耕地土壤状况尚不明确。因此，通过明确中国南方红壤区典型县域土壤健康，掌握典型县域土壤现状，对促进区域农业发展具有重要意义。通过县域野外采样后的实验室分析的土壤指标数据来筛选最优数据集，进而从不同的集成算法模型中依据模型性能指数，找到最优模型评估当地土壤健康状况，从而应用到定位实验的农田系统中，来剖析不同施肥措施土壤健康与生态系统功能状况。同时，分析土壤重金属对农业生态系统的限制性影响，最终通过量化不同施肥措施下土壤 EMF、土壤健康以及作物相

关指标的关系揭示其贡献率。为提高生产效率，实现经济效益的最大化，确保可持续农业发展提供理论支撑。

基于 **SMAF** 土壤健康评估框架，并结合定位试验及县域野外调研，探究了典型县域耕地土壤健康评估方法的构建与应用。目前的主要结果：（1）典型县域耕地土壤健康评估最优数据集的筛选方法是因子分析(载荷变量)结合谱聚类(**Distance matrix**)；（2）利用构建的最优方法从 **25** 个土壤指标中筛选出 **8** 个影响红壤旱地土壤健康状况的关键指标（有机质、**Pielou** 均匀度指数、平均重量直径、**Shannon** 多样性指数、全氮、**Richness** 丰富度指数、**pH**、水稳性团聚体比例）；（3）全氮、有机质是影响土壤生态系统多功能性指数的重要指标，物理结构与缓冲功能、土壤生物多样性维持功能是影响土壤健康的关键功能。

5.1 典型县域耕地土壤健康评估最优方法的构建

5.1.1 土壤健康指标描述性统计

选取不同的物理、生物、化学指标共 **25** 个。土壤 **pH** 值范围在 **4.18** 至 **6.96** 之间；敏感指标是速效磷(**CV=83.25%**)，几何平均直径(**CV=66.30%**)，酸性磷酸酶(**CV=61.78%**)。

表 1 岳阳汨罗各土壤指标描述性统计

Soil Indicators	Minimum	Maximum	Mean	SD	CV (%)
BD (g cm^{-3})	1.08	1.72	1.32	0.13	9.52
WSA>0.25 (%)	4.86	65.76	30.65	13.51	44.09
MWD (mm)	0.09	1.13	0.48	0.22	44.22
GMD (mm)	0.03	0.50	0.14	0.08	56.30
wVLSI	0.04	0.39	0.21	0.08	39.93
pH	4.18	6.86	5.03	0.50	9.98
SOM (g kg^{-1})	5.03	46.67	18.34	6.76	36.86
TN (g kg^{-1})	0.23	2.75	1.11	0.39	34.76
TP (g kg^{-1})	0.16	2.41	0.70	0.40	56.86
TK (g kg^{-1})	11.79	34.80	16.50	5.55	33.62
AN (mg kg^{-1})	19.16	404.35	103.06	54.23	49.73
AP (mg kg^{-1})	6.93	201.44	39.28	32.70	83.25
AK (mg kg^{-1})	33.43	407.01	163.56	87.65	47.65
Shannon	3.91	8.32	7.49	0.88	11.88
Inv_Simpson	83.72	1632.38	577.25	117.64	20.48
Pielou_evenness	0.71	0.92	0.86	0.04	4.42
Simpson_evenness	0.01	0.36	0.09	0.04	48.09
Richness	3946.00	8700.00	6291.67	1212.04	19.28
Chao1	4021.84	12656.76	3026.03	1819.84	20.16
ACE	4723.67	13466.85	3444.56	1914.67	20.27
MBC (mg kg^{-1})	33.90	349.35	146.42	70.53	48.17
MBN (mg kg^{-1})	2.11	32.02	12.30	5.56	45.24
URE ($\text{ug g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$)	124.39	1413.92	568.47	247.33	43.31
ACP ($\text{umol g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$)	6.91	107.96	16.73	10.34	61.76
SUC ($\text{mg g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$)	3.48	23.45	8.93	2.84	30.52

注：SD，标准差；CV，变异系数；BD，容重；WSA，水稳性团聚体比例；MWD，平均重量直径；GMD，几何平均直径；wVLSI，向量长度稳定性指数；SOM，有机质；TN，全氮；TP，全磷；TK，全钾；AN，速效氮；AP，有效磷；AK，速效钾；Shannon，Shannon 多样性指数；Inv_Simpson，Inv_Simpson 多样性指数；Pielou_evenness，Pielou 均匀度指数；Simpson_evenness，Simpson 均匀度指数；Richness，Richness 丰富度指数；Chao1，Chao1 丰富度指数；ACE，ACE 丰富度指数；MBC，微生物量碳；MBN，微生物量氮；URE，脲酶；ACP，酸性磷酸酶；SUC，蔗糖酶。

5.1.2 最小数据集的不同筛选方法

5.1.2.1 传统统计学方法

利用拟合度、边际效益阈值和曲率变化率，共同判断出指标筛选至 8 个时能够实现土壤健康评估的“成本-效益”平衡（图 5-2）。通过方差阈值结合相关性的方法，最终筛选出的最小数据集（MDS）是 Richness 丰富度指数、脲酶、速效钾、有效磷、微生物量碳、速效氮、pH、Inv_Simpson 多样性指数。通过聚类法结合指标相似性的方法筛选出的最小数据集是 Inv_Simpson 多样性指数、Chao1 丰富度指数、ACE 丰富度指数、pH、脲酶、Richness 丰富度指数、Shannon 多样性指数、微生物量碳。通过主成分分析结合贡献度筛的方法选出的最

小数据集是 **ACE** 丰富度指数、**Chao1** 丰富度指数、**Richness** 丰富度指数、**Inv_Simpson** 多样性指数、**pH**、微生物量碳、脲酶、速效钾。通过因子分析结合载荷变量的方法选出的最小数据集是 **Shannon** 多样性指数、**Richness** 丰富度指数、**Pielou** 均匀度指数、**pH**、水稳性团聚体比例、有机质、平均重量直径、**Simpson** 均匀度指数。

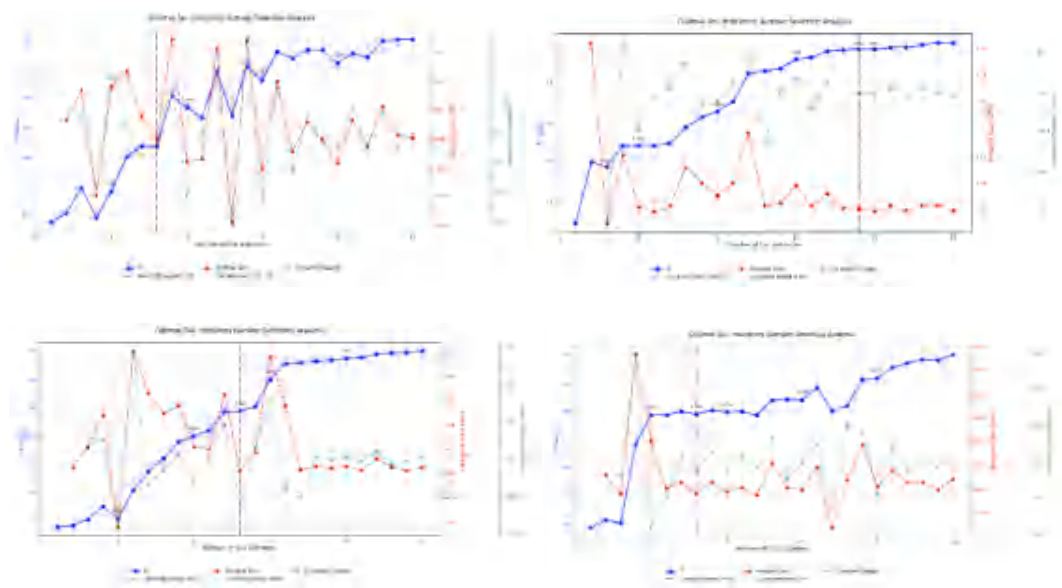


图 5-2 最优土壤指标数量选择分析（传统统计方法）

5.1.2.2 机器学习方法

通过自编码器 (**scikit-learn—MLPRegressor**)的方法，最终筛选出的最小数据集是蔗糖酶、容重、有效磷、酸性磷酸酶、微生物量氮、**pH**、速效钾、有机质。通过谱聚类(**Distance matrix**)的方法筛选出的最小数据集是蔗糖酶、微生物量氮、平均重量直径、**Chao1** 丰富度指数、**Richness** 丰富度指数、**pH**、全钾、**Shannon** 多样性指数。通过互信息(**RobustScaler—ICA**) 的方法筛选出的最小数据集是蔗糖酶、酸性磷酸酶、全磷、速效氮、全氮、有机质、**pH**、有效磷。

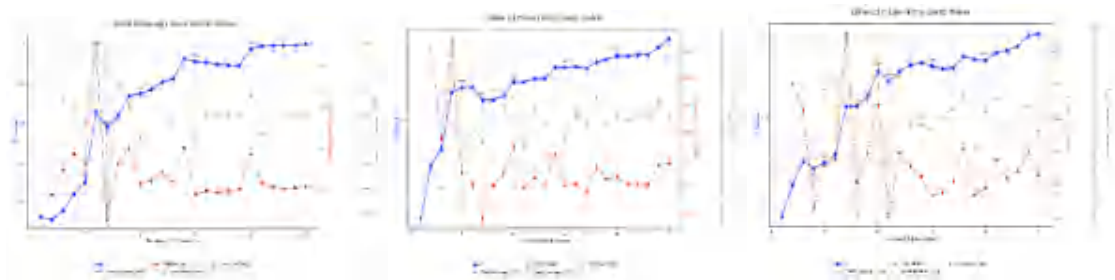


图 5-3 最优土壤指标数量选择分析（机器学习）

5.1.3 最小数据集的精度验证

通过对方差阈值结合相关性、聚类法结合指标相似性、主成分分析结合贡献度、因子分析结合载荷变量、自编码器 (scikit-learn—MLPRegressor)、谱聚类 (Distance matrix) 以及互信息 (RobustScaler—ICA) 的方法筛选出的最小数据集计算的土壤健康指数分别与总数据集计算的土壤健康指数进行拟合分析(图 5-4)可知, 对于四种传统统计学方法因子分析结合载荷变量的效果最好, 对于三种机器学习方法谱聚类的方法效果最好。

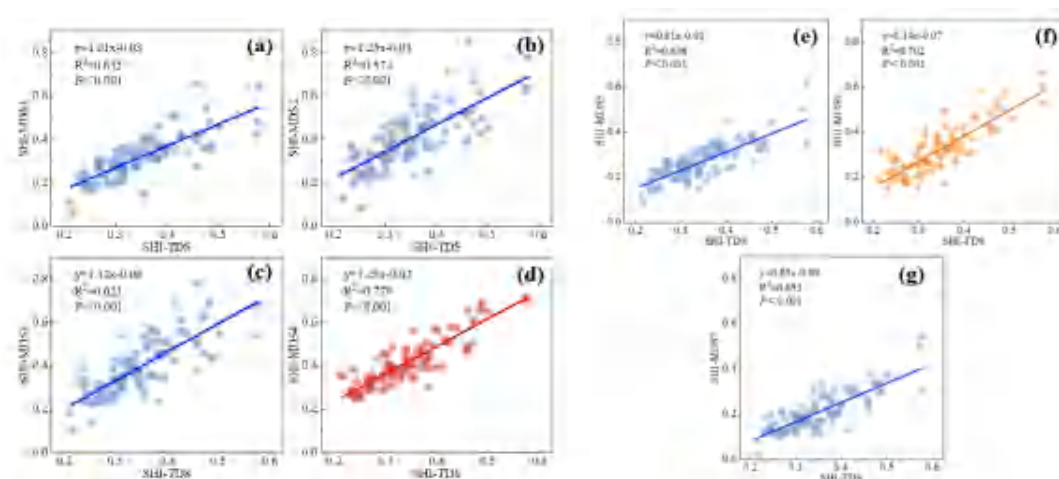
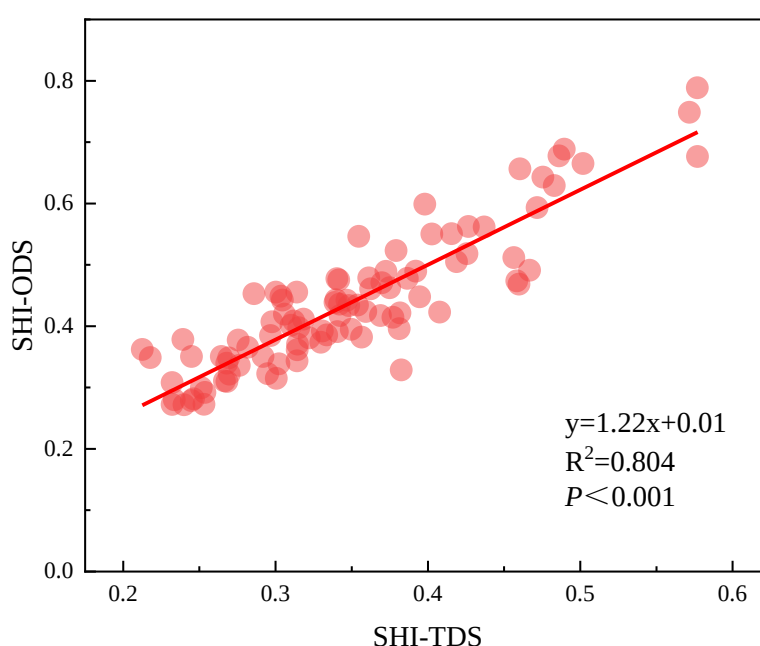


图 5-4 MDS 的准确性验证。(a) 方差阈值结合相关性；(b) 聚类方法结合指标相似度；(c) 主成分分析结合贡献度；(d) 因子分析结合载荷变量；(e) 自编码器 (scikit-learn - MLPRegressor)；(f) 谱聚

类（距离矩阵）；(g) 互信息（RobustScaler + ICA）

5.1.4 最优方法与最优数据集

综合以上结果利用因子分析(载荷变量)结合谱聚类(Distance matrix)的方法对所有土壤指标进行筛选得出最优数据集（ODS），拟合分析可得，SHI-TDS 与 SHI-ODS 的拟合方程为 $y=1.22x+0.01$ ($R^2=0.804$, $P<0.001$)。

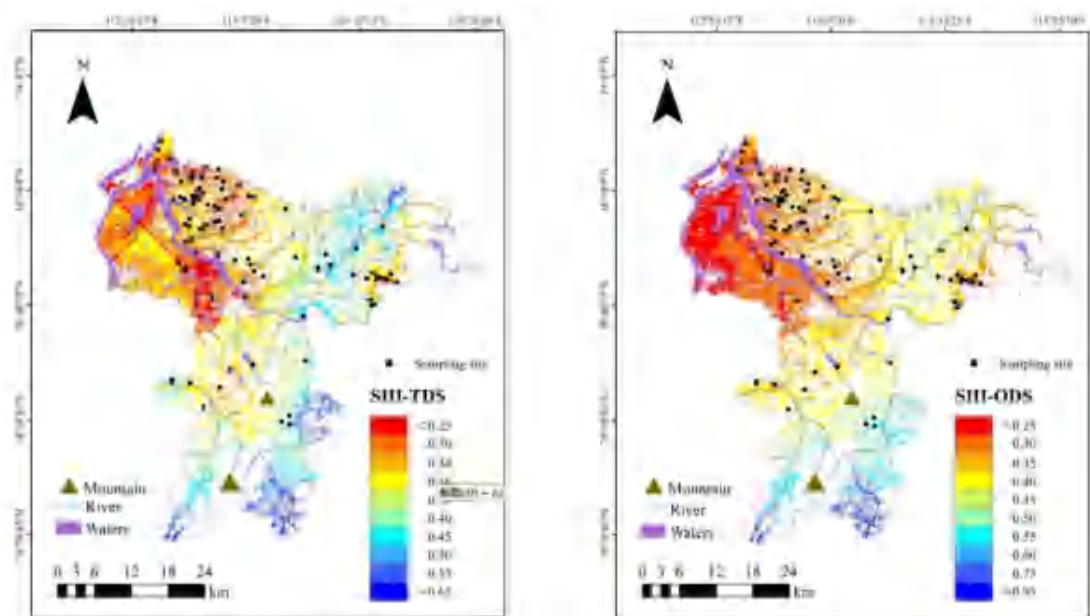


注：SHI- TDS（土壤健康指数-总数据集）；SHI-ODS（土壤健康指数-最优数据集）

图 5-5 采用因子分析（载荷变量）与谱聚类（距离矩阵）相结合的方法验证拟合精度

5.1.5 土壤健康指数的空间分布

通过空间分布图（土地利用方式为耕地）可以发现，在汨罗市域内西北部的土壤健康指数数值相对比较低，西北部分布较多的水系，而南部地区的土壤健康指数相对比较高，有山脉坐落。



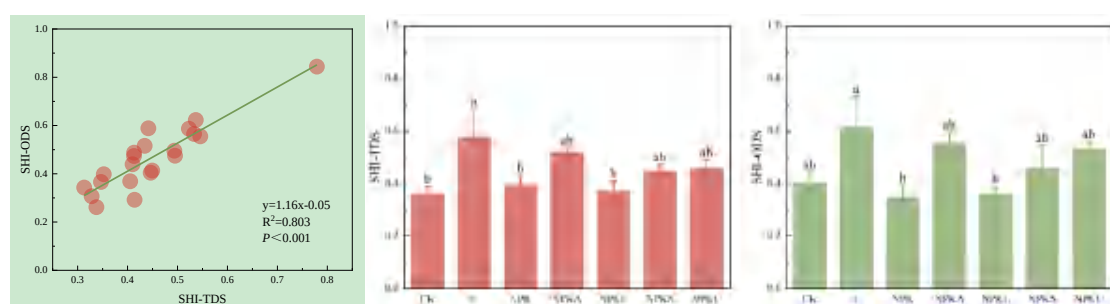
注：SHI- TDS（土壤健康指数-总数据集）；SHI-ODS（土壤健康指数-最优数据集）

图 5-6 岳阳汨罗市土壤健康指数空间分布

5.2 不同管理措施下土壤健康指数的变化

5.2.1 土壤健康评估最优方法的应用与验证

利用定位试验土壤指标数据验证因子分析(载荷变量)与谱聚类(Distance matrix)结合的方法筛选出来的最优数据集的效果，分析可知，拟合度较高，比较理想。



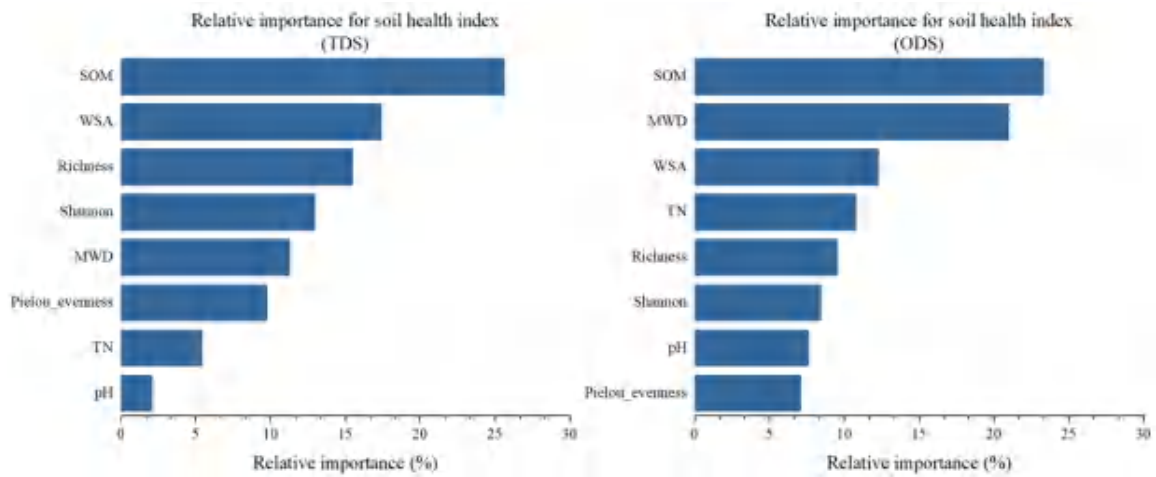
注：CK - 无施肥，种植作物；F - 休闲；NPK - 施用氮磷钾复合肥；NPKA - 施用氮磷钾复合肥和骨粉有机肥；NPKL - 施用氮磷钾复合肥和消石灰；NPKS - 施用氮磷钾复合肥并将前季作物秸秆直接还田；NPKC - 施用氮磷钾复合肥和生物有机肥。SHI-TDS - 土壤健康指数-总数据集；SHI-ODS - 土壤健康指数-最优数据集。结果为三次重复的平均值（n=3）。

不同小写字母表示不同处理间存在显著差异（P<0.05）

图 5-7 优化方法已应用于定位实验并得到验证

5.2.2 土壤健康指数的相对重要性

通过分析最优数据集的土壤指标对土壤健康指数相关重要值分析可以发现，对于不同管理措施下的土壤健康状况，有机质是影响其变化的重要指标。

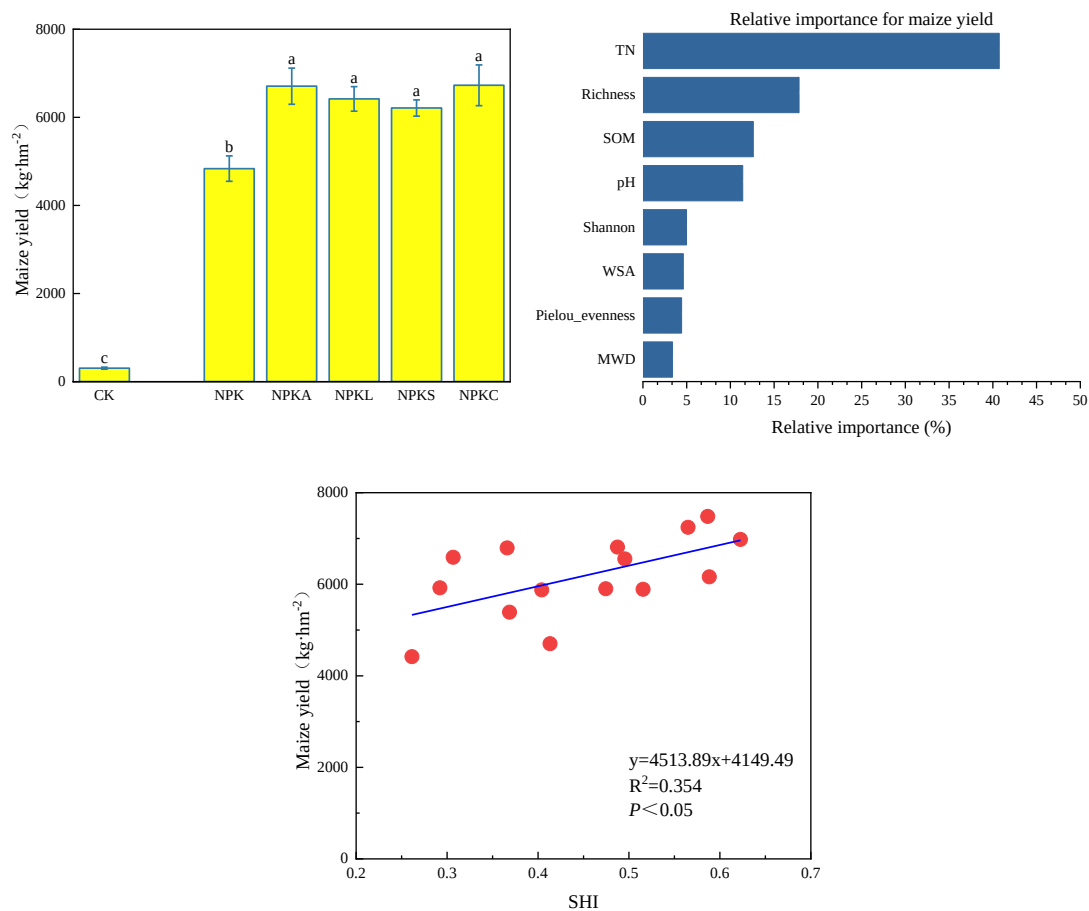


注：WSA，水稳性团聚体比例；MWD，平均重量直径；SOM，有机质；TN，总氮；Shannon，香农多样性指数；Pielou_evenness，Pielou 均匀度指数；Richness，丰富度指数；TDS，总数据集；ODS，最优数据集

图 5-8 土壤健康指数的相对重要性

5.2.3 产量与土壤健康的关系

与施 NPK 相比，骨粉有机肥、生石灰、作物秸秆、生物有机肥的添加使用分别使玉米产，提高了 38.70%、32.74%、28.46%、39.12%；最优数据集中，全氮和 pH 是影响玉米产量的重要指标；土壤健康指数每提高 0.1 个单位，玉米产量将提高 451.39 kg/hm²。



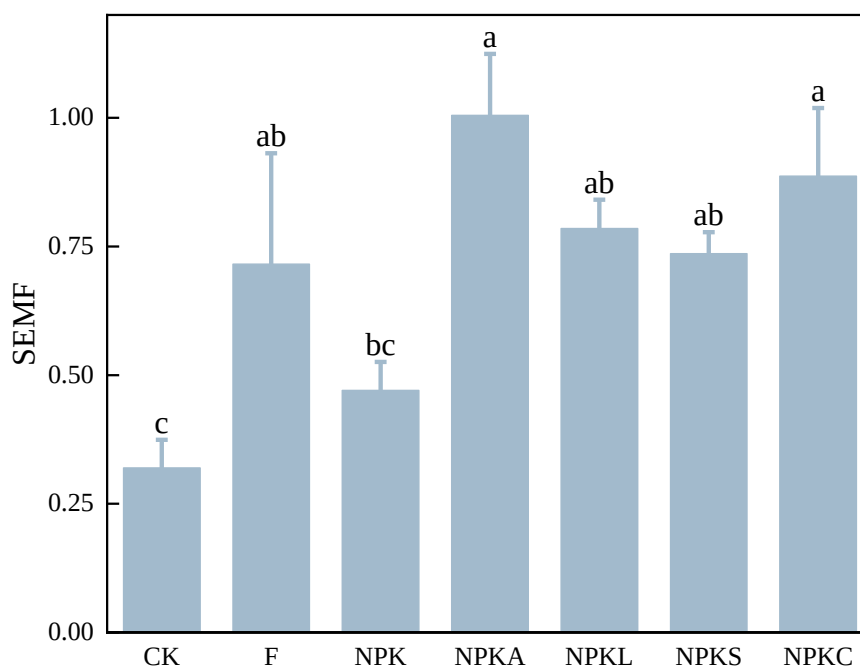
注：CK，不施肥，种植作物；NPK，施用氮磷钾复合肥；NPKA，施用氮磷钾复合肥和骨粉有机肥；NPKL，施用氮磷钾复合肥和消石灰；NPKS，施用氮磷钾复合肥并将前季作物秸秆直接还田；NPKC，施用氮磷钾复合肥和生物有机肥；WSA，稳定团聚体比例；MWD，平均重量直径；SOM，有机质；TN，全氮；Shannon，香农多样性指数；Pielou_evenness，皮尔欧均匀度指数；Richness，丰富度指数；SHI，土壤健康指数。不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P < 0.05$ ）

图 5-9 生产与土壤健康之间的关系

5.3 土壤健康与土壤生态系统多功能性的关系

5.3.1 不同管理措施下土壤生态系统多功能性指数的变化

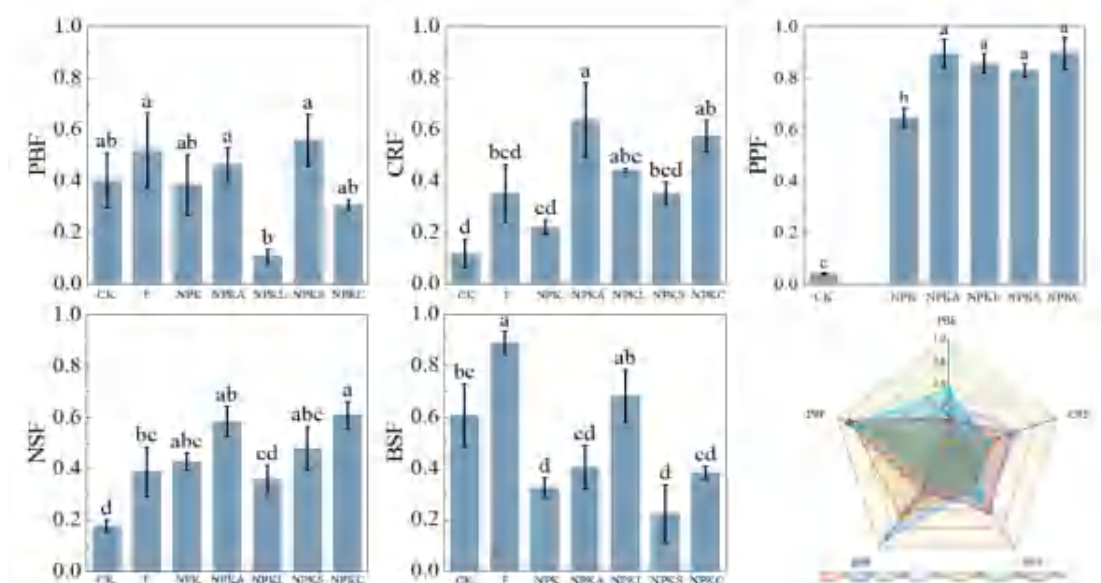
与 NPK 相比，施 NPK 肥结合骨粉有机肥、生石灰、上季作物秸秆、生物有机肥分别使土壤生态系统多功能性指数提高 113.65%、66.92%、56.48%、88.56%（ $P < 0.05$ ）。



注：CK - 不施肥，种植作物；F - 休闲；NPK - 施用氮磷钾复合肥；NPKA - 施用氮磷钾复合肥和骨粉有机肥；NPKL - 施用氮磷钾复合肥和消石灰；NPKS - 施用氮磷钾复合肥并在田间直接还田前季作物秸秆；NPKC - 施用氮磷钾复合肥和生物有机肥；SEMF - 土壤生态系统多功能性指数

图 5-10 不同管理措施下土壤生态系统多功能性指数的变化

不同改良措施下的土壤物理结构与缓冲功能、碳固持功能、初级生产力功能、养分的供给与循环功能以及土壤生物多样性维持功能与对照处理相比有所提升，土壤物理结构与缓冲功能中，施 NPK 肥结合生石灰的处理效果并不理想；土壤生物多样性维持功能中，施 NPK 肥结合生石灰的处理效果较好，但结合其他改良措施的功能指数较低，参考土壤 pH 值可知，对于红壤旱地的管理中，若要提高土壤生物多样性功能，首先要保证合理的降酸。

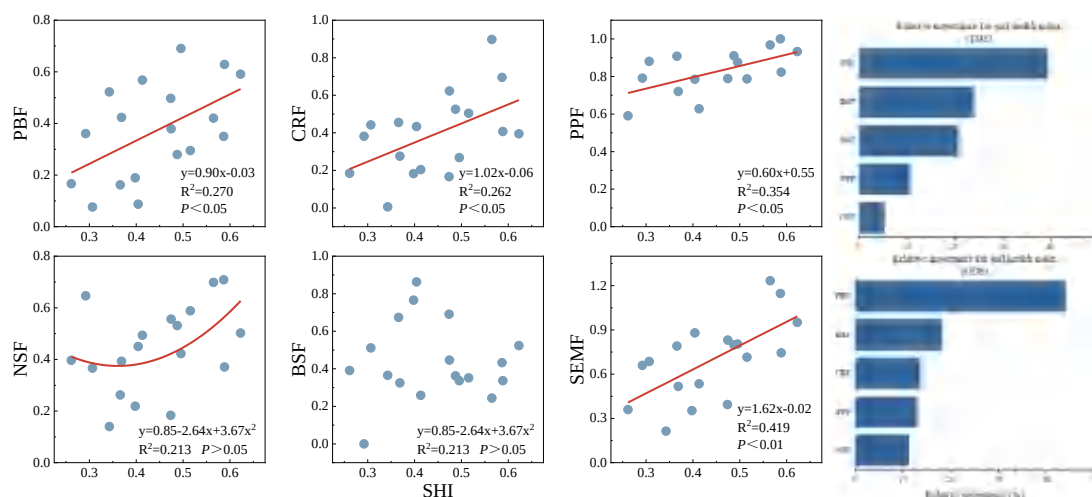


注：CK，不施肥，种植作物；F，休闲；NPK，施用氮磷钾复合肥；NPKA，施用氮磷钾复合肥和骨粉有机肥；NPKL，施用氮磷钾复合肥和消石灰；NPKS，施用氮磷钾复合肥并将前季作物秸秆直接还田；NPKC，施用氮磷钾复合肥和生物有机肥；PBF，物理结构与缓冲功能；CRF，碳汇功能；PPF，初级生产力功能；NSF，养分供给与循环功能；BSF，土壤生物多样性维持功能；SEMF，土壤生态系统多功能性指数

图 5-11 不同管理措施下土壤各项功能的变化

5.3.2 土壤健康指数与土壤功能的关系

不同土壤功能整体上随着土壤健康指数的增加而提高；土壤生物多样性维持功能与土壤健康指数的关系不显著；当土壤健康指数每提高 0.1 个单位，土壤生态系统多功能性指数提高 0.16 个单位。物理结构与缓冲功能、土壤生物多样性维持功能是影响土壤健康的关键功能（ $PBF > BSF > NSF/CRF > PPF$ ）。

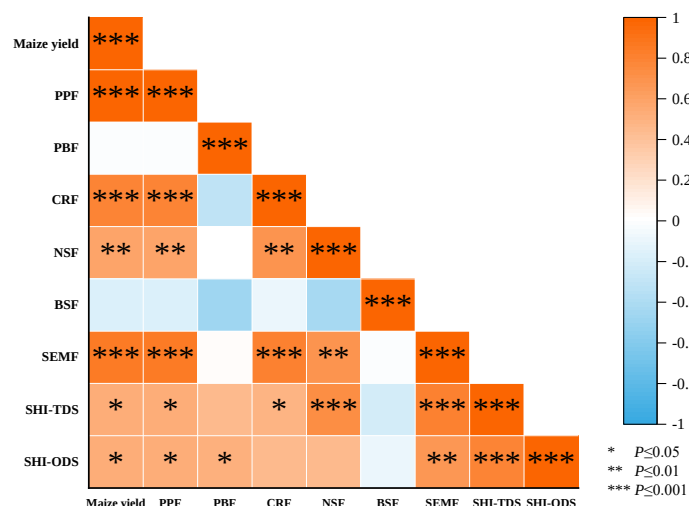


注：PBF 代表物理结构与缓冲功能；CRF 代表碳稳定功能；PPF 代表初级生产力功能；NSF 代表养分供给与循环功能；BSF 代表土壤生物多样性维持功能；TDS 代表总数据集；ODS 代表最优数据集；SHI 代表土壤健康指数；SEMF 代表土壤生态系统多功能性指数

图 5-12 土壤健康指数与土壤功能之间的关系

5.3.3 产量与土壤健康、土壤功能的关系

玉米产量与初级生产力功能、碳固持功能、土壤生态系统多功能性指数极显著正相关 ($P < 0.001$)；与养分的供给与循环功能显著正相关 ($P < 0.01$)；与土壤健康指数正相关 ($P < 0.05$) 未知。玉米产量与物理结构与缓冲功能、土壤生物多样性维持功能无显著相关关系。

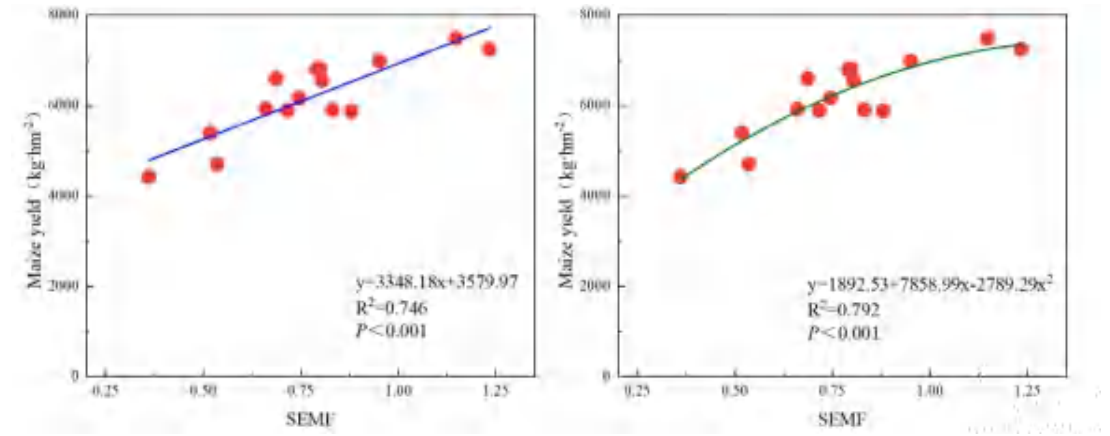


注：PBF 代表物理结构与缓冲功能；CRF 代表碳稳定功能；PPF 代表初级生产力功能；NSF 代表养分供给与循环功能；BSF 代表土壤生物多样性维持功能；SEMF 代表土壤生态系统多功能性指数；SHI-TDS 代表土壤健康指数-总数据集；SHI-ODS 代表土壤健康指数-最优数据集

图 5-13 玉米产量与土壤健康及土壤功能之间的关系

5.3.4 产量与土壤生态系统多功能性指数的关系

土壤生态系统多功能性指数每提高 0.1 个单位，玉米产量将提高 334.82 kg/hm²；产量提升的潜力有限，且提升的幅度在缓慢变小。



注： SEMF ， 土壤生态系统多功能性指数。

图 5-14 玉米产量与土壤生态系统多功能性指数的关系

(二) 技术经济论证

1 创新性地构建了土壤健康评价与定向培育体系，科学性强。目前的耕地质量评价标准多聚焦于土壤本身的理化或环境指标，与作物产出和品质的关联性不足。本规程首创了“土壤健康综合评分”与“作物健康综合评分”双核驱动的综合评价方法，通过主成分分析客观确定土壤指标权重，并引入作物品质指数与相对产量构建作物健康评分，最终形成 1-9 级的综合健康等级划分。该方法实现了从孤立评价土壤到系统诊断“土壤-作物”健康的跨越，解决了传统评价中“土壤等级高而作物产量品质不匹配”的问题，科学性更强。

2 依据综合健康等级实施定向培育，提质增效和地力提升效果显著。

标准起草小组成员所在团队前期在南方红壤区的验证试验表明，依据本规程进行的健康等级评价结果，能够精准反映耕地存在的核心障碍因素。根据评价结果匹配的定向培育技术体系，如针对不同等级集成秸秆还田、绿肥、石灰质改良、测土配方施肥及作物轮作等技术，能够实现技术的精准投放。验证结果表明，应用本规程可使示范区粮油作物平均增产 **8%**以上，品质指标显著改善，土壤有机质含量提升 **10%**以上，酸化趋势得到有效遏制，经济和社会效益明显。

3 规程指标与方法可获取性强，技术路径清晰，便于推广。

本标准选用的土壤物理、化学及作物品质指标均为常规检测项目，其测定方法均引用现行有效的国家标准或行业标准，各级检测机构均具备分析能力。虽然土壤微生物指标等建议在更高级别实验室完成，但核心的健康等级划分主要依赖于易获取的理化指标和作物指标。同时，技术路径通过流程图形式呈现，并结合了手机微信端 **NE** 系统小程序等便捷工具，操作性强，便于基层农技人员和规模化种植主体理解和应用。

（三）预期的经济效益

1 该规程的实施可显著提高红壤旱地的农业生产效益

通过本规程的实施，可实现红壤旱地耕地的精准投入和定向培育。预计可使玉米、油菜、花生等主要粮油作物平均增产 **5%-10%**，农产品品质（如蛋白质、淀粉、油酸含量等）同步提升，市场竞争力增强。同时，通过基于健康等级的精准施肥和土壤管理，可减少化肥和改良剂的盲目投入，预计降低生产资料成本 **5%**以上，从而实现节本增效，

直接提高农业生产者的经济收入。

2 该规程的实施将为保障国家粮食安全和农产品质量安全提供重要技术支撑

本规程面向我国重要的南方红壤旱地粮油产区，其推广应用将系统提升该区域耕地的基础地力和可持续生产能力，对稳定粮油供给、践行“藏粮于地”战略具有重要意义。通过促进作物健康生长和品质提升，为市场提供更多优质农产品，有助于满足人民群众对高品质食物的需求，社会效益显著。

3 该规程的实施将促进农业绿色发展和生态环境改善

本规程倡导的有机无机配施、秸秆还田、种植绿肥等培育技术，能有效增加土壤有机质，改善土壤团粒结构，增强土壤保水保肥能力。通过控酸改良和科学施肥，可减少养分流失对水体的面源污染，降低农业碳排放。该规程的实施将推动红壤旱地农业从追求产量向提质增效、资源节约、环境友好的绿色发展方向转型，生态效益长远。

四、标准涉及的相关知识产权说明

本文件按照 **GB/T 1.1-2020**《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求，对可能涉及的知识产权内容进行说明，以确保标准的合规性和可实施性。南方红壤旱地健康定向培育技术规程整合了多项创新方法和技术指标，部分内容可能涉及专利、版权等知识产权问题。以下依据标准起草规则和实际技术内容进行详细阐述。

（一）专利情况说明

本文件在技术内容中可能涉及专利技术，如定向培育技术中的秸秆还田、养分推荐施肥系统（如 **NE** 系统）等。具体而言，附件 3：中国植物营养与肥料学会团体标准草案中的附录 C 提到的养分管理专家系统（**Nutrient Expert, NE**）已开发手机微信版，其算法和界面设计可能包含软件专利；基于 **SMAF** 框架的土壤健康评估方法优化也可能涉及分析方法专利。依据 **GB/T 1.1-2020** 第 7.5 条，标准中如引用专利技术，需明确声明。本文件在前言部分已注明“请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任”，此声明符合标准化规则，旨在避免潜在纠纷，同时鼓励技术创新应用。

（二）版权和引用内容说明

本文件引用了多项规范性文件（如 **GB**、**NY/T** 系列标准）和学术文献，这些引用内容可能受版权保护。例如，土壤指标测试方法引用 **GB/T 39228-2020** 等标准，其文本和结构版权归标准发布机构所有；作物健康评价方法参考了张江周等（2022）的研究进展，文献版权属于出版方。依据 **GB/T 1.1-2020** 第 6.5 条，规范性引用文件通过标注日期和版本确保合法性，本文件在第二章“规范性引用文件”中完整列出了所有引用标准，避免侵权风险。同时，附件 3：中国植物营养与肥料学会团体标准草案和附件 4：中国植物营养与肥料学会团体标准制修订项目编制说明中的原始数据及图表（如土壤健康指数分布图）版权归研究单位所有，但已获授权用于本标准编制，符合学术规范。

（三）免责声明和依据

本文件不承担识别所有知识产权的责任，依据 **GB/T 1.1-2020** 的指导，标准发布机构仅确保技术内容的科学性，不介入专利纠纷。此声明基于附件 **3**: 中国植物营养与肥料学会团体标准草案的前言部分，并参考国际标准化实践，如 **ISO/IEC** 导则中的专利政策。本说明旨在促进标准推广应用，同时保护创新主体权益，符合国家标准化管理委员会的相关规定。

综上，本文件的知识产权说明严格遵循 **GB/T 1.1-2020**，确保标准起草的规范性和合法性，为南方红壤旱地健康培育提供可靠技术支撑。

五、采用国际标准和国外先进标准的程度，以及与国际、国外同类标准水平的对比情况，或与测试的国外样品有关数据的对比情况

经多方查新，国际上尚未有专门针对“红壤旱地健康”且融合“土壤-作物”综合评价与培育的技术规程发布。国内现有标准如《**GB/T 33469-2016 耕地质量等级**》、《**NY/T 1121-2006 系列土壤检测标准**》等，为本文件的制定提供了重要的方法学基础。然而，与本文件相比，存在显著区别：

一是核心理念与目标不同。现有耕地质量标准多聚焦于土壤本身的肥力状况和环境安全，以实现耕地分等定级和产能核算为主要目标。本文件则创新性地提出了“土壤-作物综合健康”的核心理念，其目标不仅是评价土壤，更是通过构建“土壤健康”与“作物健康”双核驱动的综合评价体系，实现耕地健康状况的精准诊断，并为不同健康等级的耕地提供精准的定向培育技术方案，最终目标是同步提升地力和

农产品品质。

二是评价方法与指标体系不同。现有标准多采用指标加权或简单加和的方式进行评价。本文件在土壤健康评价中引入了主成分分析（PCA）法定量计算指标权重，使权重分配更具客观性和统计学依据。更重要的是，本文件独创了“作物健康综合评分”概念，将其定义为作物品质指数与相对产量乘积的平方根，并将此评分与土壤健康评分结合，共同划分综合健康等级，实现了从“单一土壤评价”到“土壤-作物系统评价”的跨越。

三是技术路径的针对性与系统性不同。国内现有技术规范多针对某一具体技术环节，如《NY/T 3443-2019 石灰质改良酸化土壤技术规范》侧重酸土改良，《NY/T 1118-2006 测土配方施肥技术规范》侧重养分管理。本文件则针对南方红壤旱地“酸、瘦、黏、板”等突出问题，系统整合了从样品采集、健康诊断到定向培育的完整技术链条，形成了“检测-评价-分区-施策”的一体化解决方案，技术集成度和系统性更强，对南方红壤旱地的针对性也更为明确

六、重大意见分歧的处理经过和依据

无。

七、其他应予说明的事项

2026 年 7 月征求意见阶段时，因标准技术内容完善需求，经协调，永州市农业综合服务中心张艳峰、许欢、郭曦隆和胡议佳加入编制组，共同参与后续内容的修订工作。因此起草单位增加了永州市农业综合服务中心，起草人相应增加了该单位的张艳峰、许欢、郭曦隆

和胡议佳。