

# 山东烟区砂质土改良与可持续利用研究进展

陈璟睿<sup>1</sup>, 袁万臣<sup>2</sup>, 马志远<sup>2</sup>, 欧开元<sup>3</sup>, 田雷<sup>3</sup>, 杨杰<sup>3</sup>, 王恩忠<sup>2</sup>, 高强<sup>3</sup>, 宗浩<sup>3</sup>,  
王丽丽<sup>3</sup>, 谭效磊<sup>3</sup>, 苏兆亮<sup>2</sup>, 郗爱峰<sup>2</sup>, 张春波<sup>3</sup>, 郑彤妍<sup>1</sup>, 侯欣<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>山东农业大学植物保护学院, 山东 泰安

<sup>2</sup>山东淄博烟草有限公司, 山东 淄博

<sup>3</sup>山东临沂烟草有限公司, 山东 临沂

收稿日期: 2025年5月4日; 录用日期: 2025年6月3日; 发布日期: 2025年6月11日

## 摘要

山东省作为中国核心烟叶产区, 砂质土占比超60%, 其保水保肥能力弱、养分贫瘠等问题严重制约烟草优质生产。本文系统解析砂质土物理、化学及微生物特性, 揭示其对烟草根系发育、产量和品质的影响机制。通过集成有机物料改良、无机肥精准调控与保水剂应用, 实现烟叶上等烟比例提高及产值增长。研究证实, 技术协同可降低水土流失, 但长期生态风险监测与低成本材料开发仍需突破。本文为砂质土烟田生态-经济协同管理提供理论依据和技术范式。

## 关键词

砂质土, 改良, 可持续利用

# Research Progress on Sandy Soil Improvement and Sustainable Utilisation in Shandong Tobacco Region

Jingrui Chen<sup>1</sup>, Wanchen Yuan<sup>2</sup>, Zhiyuan Ma<sup>2</sup>, Kaiyuan Ou<sup>3</sup>, Lei Tian<sup>3</sup>, Jie Yang<sup>3</sup>,  
Enzhong Wang<sup>2</sup>, Qiang Gao<sup>3</sup>, Hao Zong<sup>3</sup>, Lili Wang<sup>3</sup>, Xiaolei Tan<sup>3</sup>, Zhaoliang Su<sup>2</sup>,  
Aifeng Chi<sup>2</sup>, Chunbo Zhang<sup>3</sup>, Tongyan Zheng<sup>1</sup>, Xin Hou<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an Shandong

<sup>2</sup>Shandong Zibo Tobacco Co., Ltd., Zibo Shandong

<sup>3</sup>Shandong Linyi Tobacco Co., Ltd., Linyi Shandong

Received: May 4<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2025; published: Jun. 11<sup>th</sup>, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 陈璟睿, 袁万臣, 马志远, 欧开元, 田雷, 杨杰, 王恩忠, 高强, 宗浩, 王丽丽, 谭效磊, 苏兆亮, 郗爱峰, 张春波, 郑彤妍, 侯欣. 山东烟区砂质土改良与可持续利用研究进展[J]. 农业科学, 2025, 15(6): 742-750.

DOI: 10.12677/hjas.2025.156091

## Abstract

As a core tobacco-producing area in China, Shandong Province has more than 60% sandy soils, which are weak in water and fertilizer retention and poor in nutrients, severely restricting the quality production of tobacco. This paper systematically analyses the physical, chemical and microbiological properties of sandy soils, and reveals their influence mechanisms on tobacco root development, yield and quality. Through the integration of organic material improvement, inorganic fertilizer precision control and water retention agent application, the proportion of top-grade tobacco is increased and the production value is increased. The study confirms that technological synergy can reduce soil erosion, but long-term ecological risk monitoring and low-cost material development still need breakthroughs. This paper provides a theoretical basis and technical paradigm for the ecological-economic synergistic management of tobacco fields in sandy soils.

## Keywords

Sandy Soil, Improvement, Sustainable Utilisation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

山东省作为中国重要的优质烟叶生产基地[1],其烟叶产量约占全国总量的12%,常年稳居全国前三,是“中华”“泰山”等知名卷烟品牌的核心原料供应区。该区域烟田集中分布于鲁中、鲁南的丘陵地带及黄泛冲积平原,其中砂质土占比高,独特的土壤环境既赋予了烟叶特有的香气风格,也因保水保肥能力弱、养分易流失[2]等问题,成为制约烟叶优质高产的关键瓶颈。有研究表明,选择适宜土壤有利于调节烟叶中的烟碱含量[3],烤烟品质特征与成土母质类型及土壤理化性状存在显著关联性。砂质土壤因粗颗粒占比大导致有效肥力水平较低,其烟叶生物碱合成量通常维持在较低区间;与之相反,黏质土壤因细粒组分富集而具有较高的氮素有效性,促使烟叶烟碱积累显著增加[4]。因此,解析砂质土特性及其与烟草生长的互动机制,研发经济高效的改良技术,对保障国家烟草原料安全、促进乡村振兴具有双重战略意义。

山东烟区砂质土以粗骨性棕壤和潮土为主[5][6],砂粒含量普遍超过70%,孔隙度达45%~55%,虽利于根系透气,但土壤容重偏,田间持水量不足黏壤土的40%[7]。化学特性方面,有机质含量多低于1.0%,全氮、速效磷钾等关键养分处于“极缺”水平,加之微生物群落结构单一、碳氮循环效率低下,导致烟草生长中后期易出现脱肥早衰[8]。研究表明,砂质土烟株根系虽长度增加20%~30%,但根毛密度下降,对磷、锌等元素的吸收效率显著降低[9],直接造成烟叶钾氯比失调、燃烧性下以及感官质量的下降[10]。这些特性与烟草需肥规律的矛盾,凸显了砂质土改良的迫切性。

近年来,科研人员围绕砂质土改良开展了大量研究,如生物炭添加、微生物菌剂接种、水肥一体化等技术[11]已取得阶段性成果。然而,现有技术多侧重单一因子调控,缺乏对“土壤-微生物-作物”系统的协同优化,且高成本材料难以大规模推广。此外,气候变化引发的极端干旱与暴雨交替,进一步加剧了砂质土养分淋失与结构退化。本研究系统综述山东烟区砂质土研究进展,旨在揭示其障碍形成机制,评估不同改良技术的生态经济效应,为构建区域适配的可持续管理模式提供理论支撑,助力实现“烟叶

提质、农民增收、生态安全”的多维目标。

## 2. 山东烟区砂质土的基本特性研究

### 2.1. 物理特性：疏松多孔与持水能力矛盾

山东烟区砂质土以粗骨性棕壤和潮土亚类为主，颗粒组成中砂占比达 70%~85%，黏粒含量普遍低于 15%，质地松散且结构性差[12]。空间分布上，鲁中丘陵区砂质土[13]砂粒含量显著高于鲁南黄泛区[14]，但两者孔隙度均高达 45%~55%，容重介于 1.3~1.5 g/cm<sup>3</sup>，显著高于黏壤土。这种高孔隙结构虽有利于根系穿透和气体交换，但导致田间持水量仅为 18%~22%，不足黏壤土的 40%。在干旱季节，砂质土表层水分蒸发速率达 6.2 mm/d，深水分下渗速率超过 15 cm/h [15]，加剧了烟草伸根期的水分胁迫风险。

### 2.2. 化学特性：养分贫瘠与离子失衡并存

化学分析表明，山东烟区砂质土 pH 值介于 5.8~7.2，其中鲁中丘陵区因母质风化程度高，pH 多低于 6.5，而鲁南冲积区受黄河沉积物影响，pH 普遍在 7.0 以上。土壤有机质含量仅为 0.6%~1.2%，全、速效磷[16]、速效钾均低于烟草优质生产的临界值。离子交换量(CEC)不足 8 cmol (+)/kg，导致阳离子(K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>)吸附能力弱，钾离子淋失率高达 40%~60%。中微量元素方面，有效锌、有效硼严重缺乏[17]，与烟草需肥规律形成尖锐矛盾。此外，砂质土碳酸钙含量通过影响磷素有效性，导致烟株磷吸收效率降低 15%~20%。

### 2.3. 微生物特性：群落单一与功能弱化

高通量测序结果显示[18] [19]，砂质土微生物多样性指数显著低于邻近壤。其中，放线菌门(Actinobacteria)占比超过 35%，而具有有机质降解功能的拟杆菌门(Bacteroidetes)仅占 8%~12%。功能基因分析表明[20]，与碳氮循环相关的 amoA、nifH 基因丰度分别下降 42% 和 37%，导致氮素矿化速率不足 0.8 mg/(kg·d)，仅为壤土的 50%。根际微生物组中，促生菌丰度降低，而土传病原菌相对丰度增加 2~3 倍，进一步加剧了烟草黑胫病、根黑腐病的发生风险[21]。

## 3. 砂质土对烟草的影响

### 3.1. 砂质壤土不同有机质含量对烤烟干物质累积、氮素、磷素、钾素积累的影响

有研究表明，在砂质壤土中，烤烟移栽后的生长呈现出特定规律移栽前 5 周生长缓慢，5 周后干物质积累加快，第 9 周达峰值[22]。低有机质土壤干物质累积高峰期在 5~9 周，累积量大；中有机质土壤在 9~13 周；高有机质土壤在 7~11 周[23]。土壤有机质含量差异显著影响烟株干物质累积量及速度。

当粉质壤土较为粘重且有机质含量较高时，烟株吸氮高峰期会出现延迟[24]。在土壤后期氮素供应充足的情况下打顶，烟株对氮素的吸收累积量依然较大。如果后期氮素吸收过多，会导致上部烟叶含氮量偏高。

有研究指出，不同土壤对烟株磷素累积影响有别[25]，除受自身土壤速效磷制约外，质地影响总体为：粉质壤土上磷素累积量居首，砂质壤土次之，壤土最低[23]。

于低有机质土壤中，砂质壤土所产烟叶含钾量较高，达 1.92%；在中有机质土壤里，壤土所产烟叶含钾量较高，为 2.20%；处于高有机质土壤，粉质壤土所产烟叶钾含量最高，达 2.0% [23]。烟叶含钾量受土壤因子、栽培措施、气候条件等多方面因素的共同影响[26]。

基于上述机制，建议依据土壤有机质 - 质地组合特征实施精准调控：砂质土采用保肥控释技术优化速效养分供给，黏质土通过结构改良增强通气性，配合基追肥动态配比与功能型改良剂施用，实现烟株

碳氮代谢平衡与品质协同提升。

### 3.2. 根系发育的适应性响应

砂质土疏松多孔的结构特性对烟草根系发育呈现“双刃剑”效应。从土壤物理结构分析,黏质土体因持水性能突出而易产生滞水现象,加之孔隙度偏低导致的透气性不良,对烟草根系形态建成产生抑制作用[27]。田间观测表明,砂质土中烟草主根长度较黏壤土增加 20%~30%,但侧根密度降低 40%~50%,根毛数量减少 60%~80% [28]。这种形态变化源于机械阻力降低对主根延伸的促进,以及养分分布不均导致的侧根分枝抑制。

在养分供给特征方面,黏质土壤具有较强的保肥性能,能够持续释放养分,其供肥曲线呈现前期平缓后期陡增的态势,这与烟草生育期内“少-多-少”的需肥规律存在时序性错位,最终导致烟碱过度积累[27]。根系扫描电镜显示,砂质土烟株根尖细胞壁增厚,木栓化程度提高[29],表明其通过强化结构抗性应对渗透胁迫。生理层面,根系分泌草酸、柠檬酸等有机酸含量较黏壤土提高 3~5 倍,有效活化土壤中难溶性磷,使根际有效磷浓度从 5.2 mg/kg 提升至 8.7 mg/kg ( $p < 0.05$ ) [30]。然而,过量分泌导致根系碳耗竭,光合产物向地上部转移比例下降 12%,限制了生物量积累。

### 3.3. 植株生长与品质形成的双向调控

砂质土养分供应能力的时空异质性显著影响烟草地上部发育[31]。大田试验显示,砂质土烟田团棵期至旺长期植株株高日均增长量较黏壤降低,最大叶面积指数(LAI)仅为 3.5,较对照下降。限制主要源于水分-养分耦合胁迫:砂质土速效氮含量在移栽后 60 天内下降 70% [32],导致烟株硝酸还原酶活性降低 45%,蛋白质合成受阻。

烟叶品质方面,砂质土环境诱导的代谢响应呈现显著特异性。不同质地类型土壤的对比研究表明,随着土壤机械组成由砂粒主导向粉粒过渡(壤砂土→砂壤土→壤土→粉砂质壤土),其烟碱含量呈现显著递增趋势,表明土壤质地梯度变化是调控烟叶次生代谢产物合成的重要环境因子[23]。化学分析表明,砂质土烟叶总糖含量较黏壤土提高 15%~20%,钾离子积累量增加 10%~18%,有利于改善燃烧性和灰分质量[33]。然而,烟碱含量波动范围扩大,变异系数较黏壤土显著升高,导致烟劲头与柔和度失衡。进一步研究发现,砂质土中氮素供应不稳定使烟碱合成关键酶(PMT、QPT)基因表达量波动幅度达 40%~60%,且干旱胁迫下茉莉酸信号通路激活,进一步加剧烟碱合成紊乱。此外,砂质土烟叶中性香气物质(如新植二烯、巨豆三烯酮)总量虽增加 12%~15% [34],但苯丙氨酸类香气前体物比例下降,导致香气质感单一,协调性评分降低 0.5~0.8。

## 4. 砂质土改良措施与技术优化

### 4.1. 有机物料改良与微生物激活

针对砂质土有机质匮乏的核心问题,腐殖酸类肥料与秸秆还田技术形成协同改良效应。连续两年施用腐殖酸肥料,土壤胡敏酸含量从 0.15 g/kg 提升至 0.38 g/kg,促进微团聚体比例由 12%增至 25%,有机质含量达到 1.5%~1.8% [35]。烟田试验表明,该处理下烟叶上等烟比例提高 5%~8%,产值增加 2200~3500 元/hm<sup>2</sup>。秸秆还田配合哈茨木霉菌接种,使土壤碳氮比从 18:1 优化至 25:1,容重降低 0.12~0.15 g/cm<sup>3</sup>,细菌/真菌比(B/F)从 4.3 升至 6.8 [36],纤维素降解速率提高 40%,显著缓解还田初期碳氮失衡导致的烟株黄化问题。

氮肥输入强度对土壤微生物群落结构产生差异化调控效应。试验数据显示,氮素过量投入显著抑制了土壤微生物群落多样性( $p < 0.05$ ),但在充足水分管理条件下,氮素施用对细菌群落  $\alpha$  多样性未产生统

计学显著影响[37]。进一步分析表明, 氮素迁移流失过程与 Firmicutes 门菌群丰度衰减呈现显著负相关[38], 揭示了氮肥利用率下降与特定微生物类群响应间的内在联系。灌溉氮可以显著提高土壤微生物的活性, 改善土壤微环境。

#### 4.2. 无机肥精准调控

基于砂质土养分淋失规律, 提出“基肥减量 - 追肥增效”的精准调控策略。鲁南部分烟区, 将氮磷钾比例从传统 1:1:2 调整为 1:0.5:2.5, 基肥占比从 70%降至 50%, 追肥采用硫包膜尿素(SCU)分两次施用, 使氮素利用率从 28.5%提升至 39.7%, 硝态氮淋失量减少 15%~20% [39]。中微量元素方面, 旺长期[40]叶面喷施 0.2%硫酸锌 + 0.1%硼砂溶液, 烟株赤星病发病率从 18.3%降至 12.7%, 花叶病发生率降低 30%, 烟叶钾含量提高 0.3%~0.5%, 产值增幅达 12%~15%。该技术体系通过养分时空精准投放, 实现产量 - 品质 - 环境效益的协同提升。

#### 4.3. 土壤结构改良与土壤改良剂

深翻结合客土改良可快速优化砂质土结构[41]。每公顷添加 150 吨黏土后, 土壤黏粒占比从 12%升至 18%, 田间持水量从 19%提高至 24%, 烟叶产量恢复至 2.4 t/hm<sup>2</sup> [42]。聚丙烯酰胺(PAM)保水剂通过氢键与土壤颗粒结合, 形成稳定水稳性团聚体, 使旱季 0~30 cm 土层含水量稳定在 12%~15%, 灌溉次数从常规 5~6 次减少至 3 次, 节水效率达 35%~40%。此外, 改性生物炭[43]与 PAM 复配使用, 可使铵态氮吸附量增加 25%, 硝态氮流失量降低 18%, 实现保水与保肥功能的耦合增效。虽然生物炭在短期内能够减少土壤中一氧化二氮等温室气体的排放, 但随着生物炭的老化, 其表面官能团发生变化, 可能会导致一氧化二氮的减排效果逐渐降低甚至升高排放。此外, 生物炭的添加还可能影响土壤中甲烷的排放, 其长期影响因土壤类型和环境条件而异。长期添加生物炭导致种植成本高且长期施用可能导致多环芳烃累积。

土壤改良剂的应用通过优化土壤三相结构比例, 显著改善了团聚体稳定性与孔隙连通性。有研究表明, 经改良处理的土壤持水性能提升 28.6%~34.2%, 阳离子交换量增加 17.3%~22.8%, 这主要归因于胶体表面电荷特性的调控作用[44]。土壤物理化学性质的协同改良有效延长了养分生物有效性周期, 使作物根系发育良好, 最终实现产量提升。

#### 4.4. 技术集成

为实现砂质土改良的规模化应用, 移栽时采用腐熟牛粪基质进行穴施, 配合控释肥(CRF)条施于 20 cm 深土层, 滴灌系统定时注入芽孢杆菌菌液[45]。该模式使烟株团棵期提前 5~7 天, 肥料利用率提高 22%, 烟碱含量变异系数(CV)从 28%降至 15%, 亩均综合收益增加 1800 元, 为砂质土烟田绿色生产提供可复制范式。

此外, 水肥一体化可以同时田间水分和养分进行综合管理与调控的一种农业新兴技术[46], 已广泛应用于多种作物, 覆盖我国大部分地区[47]。有研究表明, 在土壤方面, 水肥一体化处理的烤烟土壤速效钾、速效磷、有机质含量均高于对照组, 且在移栽后 120 天, 土壤 pH 接近烟草适宜生长范围。对烟株的影响表现为植物生理指标提高, 根长密度提高 37.5%, 根尖数增加 42.3% [48]。在烟株生长方面, 水肥一体化技术能有效增强养分吸收能力改善烟叶物理性质及化学成分[49], 上部叶烟碱含量控制在 2.8%~3.2%, 钾氯比优化至 4.5~6.0 [48], 提高烟叶次生代谢多酚类物质含量及中性致香物质。经济效益方面, 水肥一体化技术可显著提高烟叶产量、均价及产值, 有效提升上等烟比例[50]。在增产效果方面, 水溶肥处理优于常规肥料, 展现出更出色的增产能力, 进而带来更为显著的经济效益。缺点是在设备初期投资大、对水质要求高, 但又能够在烟株生长阶段减少人工成本。河南烟区在水肥一体化条件下[51]云烟 87 烟株根系发达, 拥有较好的根冠比, 改善了大田的群体结构, 增加了产

量，且滴灌设备降低了肥料和人工成本。

## 5. 生态效应与可持续性评价

### 5.1. 砂质土改良的生态效益

砂质土改良措施显著提升了烟田生态系统的稳定性。覆盖种植技术使地表径流量从  $550 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  降至  $330 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，土壤侵蚀模数由  $350 \text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$  下降至  $200 \text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ，有效遏制丘陵区水土流失[52]。丛枝菌根真菌(AMF)接种后，土壤微生物 Shannon 指数从 6.8 提升至 8.0，放线菌门丰度降低 12%，而具有碳固定功能的绿弯菌门(Chloroflexi)占比增加 5%，有机质年累积量提高 0.15%。此外，线虫数量减少 50%，其中植物寄生类线虫占比从 45% 降至 28%，烟草根际病害发生率下降 20%~25%。生物炭改良[53]田块的土壤碳库管理指数(CPMI)达 135，较对照区提升 35%，碳汇潜力显著增强。

### 5.2. 经济可行性与可持续性分析

成本-收益模型显示，生物炭改良初期投入成本增加 2000 元/ $\text{hm}^2$ ，但 3 年内烟叶产值累计增长 18%，投资回收期缩短至 2.5 年[54]。生命周期评价(LCA)表明，改良后烟田的温室气体排放强度从  $2.8 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/\text{kg}$  烟叶降至  $2.1 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/\text{kg}$  烟叶，氮足迹减少 40%，水资源利用效率(WUE)提升至 0.85 g/L，较传统模式提高 37%，凸显环境-经济协同增效优势[55]。

## 6. 研究不足与未来展望

### 6.1. 当前研究的局限性

现有砂质土改良技术多聚焦单一因子调控，缺乏系统性整合。例如，生物炭与微生物菌剂的协同效应仅停留在实验室阶段，田间应用中因环境异质性导致增效不稳定，干旱年份协同改良效果波动幅度达 30%~40%。此外，82%的改良试验周期短于 5 年，难以评估土壤结构改良剂(如 PAM)的长期生态风险。定位观测显示，连续施用腐植酸几年后[56]，土壤中多环芳烃(PAHs)累积量达  $0.8 \text{ mg}/\text{kg}$ ，接近生态安全阈值，提示需建立全生命周期环境影响评价体系。

### 6.2. 未来研究方向与突破路径

未来研究应着力构建“智能感知-精准调控-循环再生”技术体系。开发基于 LoRa 网络的土壤多参数传感器(水分、EC、pH)，结合机器学习算法，可实现烟田水肥需求实时诊断，误差率可控制在 8% 以内。循环农业方面，利用酒糟、菌渣等废弃物制备生物基保水材料(持水率 > 300%)，配合固氮菌包埋技术，可使改良材料成本降低 40%。同时，需建立 20 年以上长期定位试验站，解析改良措施对土壤微生物网络稳定性和碳库演变的影响机制，为碳中和目标下烟田生态管理提供理论支撑。

## 7. 结论

山东烟区砂质土通过“有机改良-结构调控-智能管理”技术体系可实现生产力与生态效益的协同提升。有机物料添加使土壤有机质含量提高，微生物 Shannon 指数提升，烟叶上等烟比例增加；保水剂与滴灌技术耦合使水分利用效率提高，并减少氮素淋失。当前研究证实，砂质土并非“低产陷阱”，通过根系-土壤-微生物互作机制挖掘及缓释材料创新，可突破传统改良技术短期性、高成本的局限。适当提高烟田肥力水平，提高烟叶含钾量和降低烟叶含氯量，对改善山东烟叶内在质量具有重要意义。未来需构建覆盖“土壤健康诊断-智能决策-碳汇管理”的全链条技术体系，推动烟田从单一生产功能向生态-经济复合系统转型，为类似生态脆弱区农业可持续发展提供范式。

## 基金项目

中国烟草总公司山东省公司重大专项，山东烟区丘陵砂质土壤保育技术集成及示范，项目编号(KN326)。

## 参考文献

- [1] 张甜甜. 地方财政视角下的烟叶税改革研究[J]. 新理财, 2024(Z1): 55-59.
- [2] 于淑芳, 杨力, 孙明, 等. 山东省高产粮田养分状况及施肥影响的研究[J]. 山东农业科学, 2000(5): 31-33.
- [3] 陈杰, 何崇文, 李建伟, 等. 土壤质地对贵州烤烟品质的影响[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(1): 35-38.
- [4] 陈海生, 王可, 刘国顺. 豫中烟区烟叶烟碱含量与土壤颗粒组成的空间变异性[J]. 河南农业科学, 2019, 48(1): 44-49.
- [5] 张王庚. “山东棕壤”分类研究进展[J]. 山东师大学报(自然科学版), 1993(4): 81-85+111.
- [6] 董艳芳, 李洪杰, 王玉霞, 等. 山东省潮土在中国土壤系统分类中的归属研究[J]. 山东农业科学, 2021, 53(6): 58-63.
- [7] 李涛, 于蕾, 万广华, 等. 近 30 年山东省耕地土壤 pH 时空变化特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 180-190.
- [8] 尹静, 张晶, 宋攀, 等. 腐植酸复合肥料对冬小麦产量、肥料利用率及土壤化学性质的影响[J]. 腐植酸, 2022(5): 39-44.
- [9] Lisuma, J., Mbega, E. and Ndakidemi, P. (2020) Influence of Tobacco Plant on Macronutrient Levels in Sandy Soils. *Agronomy*, **10**, Article No. 418. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030418>
- [10] 梁洪波, 刘昌宝, 许家来, 等. 山东不同土壤类型对烟叶品质的影响[C]//中国烟草学会. 中国烟草学会第五届理事会第二次会议暨 2005 年学术年会论文集. 2005: 96-101.
- [11] 李峰, 吕平, 徐永清, 等. 严格“砂壤土 + 土杂肥”措施落实提升烤烟质量特色[J]. 新农民, 2025(5): 96-98.
- [12] Yan, W.M. and Zhang, G. (2015) Soil-Water Characteristics of Compacted Sandy and Cemented Soils with and without Vegetation. *Canadian Geotechnical Journal*, **52**, 1331-1344. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0334>
- [13] 环海军, 杨再强, 刘岩, 等. 基于自动观测站的鲁中地区土壤水分变化规律及精细化预报模型的研究[J]. 气象科学, 2016, 36(6): 834-842.
- [14] 苟佃达, 孙爱德, 曹光杰. 鲁南典型山地丘陵地区土壤中氯含量的 ICP-MS 法测定[J]. 山东化工, 2018, 47(11): 82-83+86.
- [15] 申子航, 沈晖, 田军仓, 等. 微咸水水质对压砂地土壤入渗性能的影响[J]. 中国农村水利水电, 2021(1): 147-151.
- [16] 闫童, 赵广中, 郭学习, 等. 种植模式对鲁南地区潮土养分变化趋势的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(6): 221-227.
- [17] 马佳妮, 袁杨洋, 张艳, 等. 崂山区茶园土壤 7 种中微量元素空间分布特点[J/OL]. 农业资源与环境学报: 1-13. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0548>, 2025-01-15.
- [18] Carabassa, V., Domene, X., Ortiz, O., Marks, E.A.N. and Alcañiz, J.M. (2018) Determination of EC<sub>50</sub> Values for Cu, Zn, and Cr on Microorganisms Activity in a Mediterranean Sandy Soil. *CLEAN—Soil, Air, Water*, **47**, Article ID: 1700617. <https://doi.org/10.1002/clen.201700617>
- [19] Fan, L., Tarin, M.W.K., Zhang, Y., Han, Y., Rong, J., Cai, X., *et al.* (2021) Patterns of Soil Microorganisms and Enzymatic Activities of Various Forest Types in Coastal Sandy Land. *Global Ecology and Conservation*, **28**, e01625. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01625>
- [20] Ma, J., Wang, L., Wang, T., Ma, X., Song, X., Lu, Z., *et al.* (2025) The Role of Microbial Diversity and Moss Preference in Shaping Ecosystem Multifunctionality during Biological Soil Crusts Succession in Nutrient-Limited Sandy Soils. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07421-7>
- [21] 张算. 不同植烟土壤类型养分含量、功能微生物与酶活性的研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2017.
- [22] 曹志洪, 李仲林, 周秀如, 等. 烤烟干物质的累积及土壤环境对烟碱含量的影响[J]. 烟草科技, 1989(5): 29-33.
- [23] 蓟红霞. 土壤条件对烤烟生长、养分累积和品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2006.
- [24] 晁逢春. 氮对烤烟生长及烟叶品质的影响[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [25] 李志强 秦, 杨兴有, 刘国顺. 施磷量对烤烟体内氮磷钾含量、积累和分配的影响[J]. 河南农业科学, 2004(5): 24-

- 28.
- [26] 赵福杨, 张耸, 钱宇, 等. 不同土壤类型对烤烟化学成分及其协调性的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(20): 38-41+159.
- [27] 宋鹏飞. 延边烟叶质量特征及土壤环境与烤烟质量形成的关系研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- [28] Bruun, E.W., Petersen, C.T., Hansen, E., Holm, J.K. and Hauggaard-Nielsen, H. (2014) Biochar Amendment to Coarse Sandy Subsoil Improves Root Growth and Increases Water Retention. *Soil Use and Management*, **30**, 109-118. <https://doi.org/10.1111/sum.12102>
- [29] Mao, J., Nierop, K.G.J., Sinninghe Damsté, J.S. and Dekker, S.C. (2014) Roots Induce Stronger Soil Water Repellency than Leaf Waxes. *Geoderma*, **232**, 328-340. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.05.024>
- [30] Zhang, T., Wan, W., Sun, Z. and Li, H. (2024) Phosphorus Uptake and Rhizosphere Properties of Alfalfa in Response to Phosphorus Fertilizer Types in Sandy Soil and Saline-Alkali Soil. *Frontiers in Plant Science*, **15**, Article ID: 1377626. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1377626>
- [31] 宋贞, 高祥川. 不同土壤类型对园林植物生长的影响分析[J]. 葡萄酒, 2024(19): 76-78.
- [32] Li, J., Ren, T., Li, Y., Chen, N., Yin, Q., Li, M., *et al.* (2022) Organic Materials with High C/N Ratio: More Beneficial to Soil Improvement and Soil Health. *Biotechnology Letters*, **44**, 1415-1429. <https://doi.org/10.1007/s10529-022-03309-z>
- [33] 黄化刚, 危月辉, 王红丽, 等. 不同土壤对烤烟质体色素含量变化规律及中性致香成分的影响[J]. 江西农业学报, 2016, 28(9): 54-59.
- [34] 钱华, 杨军杰, 史宏志, 等. 豫中不同土壤质地烤烟烟叶中性致香物质含量和感官质量的差异[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(6): 17-22.
- [35] 张贺, 杨静, 周吉祥, 等. 连续施用土壤改良剂对砂质潮土团聚体及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 791-801.
- [36] 周斯豪, 王美琦, 宋瑶, 等. 长期秸秆还田对下茬还田秸秆的降解及土壤微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 532-542.
- [37] Ma, H., Sun, Q., Zhang, X. and Jiang, P. (2025) Regulation of Subsurface Drip Fertigation on Nitrogen Cycling Soil Microorganisms and N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> Emissions from Aeolian Sandy Soil in Alfalfa Field in Temperate Arid Regions. *Field Crops Research*, **326**, Article ID: 109748. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109748>
- [38] Fan, J., Du, Y., Wang, B., Turner, N.C., Wang, T., Abbott, L.K., *et al.* (2016) Forage Yield, Soil Water Depletion, Shoot Nitrogen and Phosphorus Uptake and Concentration, of Young and Old Stands of Alfalfa in Response to Nitrogen and Phosphorus Fertilisation in a Semiarid Environment. *Field Crops Research*, **198**, 247-257. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.014>
- [39] 彭科研, 赵凯男, 周发宝, 等. 氮肥减量后移对冬小麦-夏玉米两熟体系籽粒产量和氮素吸收利用的影响[J]. 华北农学报, 2025, 40(1): 133-145.
- [40] 杨苏, 戴林建, 周田, 等. 烟草微量营养元素研究现状[J]. 作物研究, 2015, 29(4): 453-456.
- [41] 孙伟奇. 日照烟区土壤养分状况评价与平衡施肥技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- [42] 文志强, 林阿典, 廖卿, 等. 秸秆还田与客土改良酸性植烟土壤及提升烟叶产质量的效果[J]. 福建农业学报, 2020, 35(6): 649-656.
- [43] 魏存, 吕豪豪, 汪玉瑛, 等. 铁改性稻壳生物炭对铵态氮的吸附效果研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 595-609.
- [44] 王若婷. KIA 作为沙质土壤改良剂的应用潜力研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
- [45] 聂庆凯. 不同种类有机肥与无机肥配施对烤烟品质及产量的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
- [46] 惠海滨, 盛萍萍. 水肥一体化技术的应用现状与发展前景[J]. 农业开发与装备, 2019(3): 136-137.
- [47] 李传哲, 许仙菊, 马洪波, 等. 水肥一体化技术提高水肥利用效率研究进展[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2): 469-475.
- [48] 童铸. 水肥一体化对植烟土壤环境及烟株生长发育的影响[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
- [49] 席奇亮, 杨铁钊, 周方, 等. 水肥一体化条件下烤烟氮素营养高效利用研究[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(2): 74-83.
- [50] 席奇亮, 赵科, 邢雪霞, 等. 水肥一体化的滴灌模式对烟叶质量及经济效益的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(18): 153-158.

- [51] 周健飞, 彭玉富, 程玉渊, 等. 水肥一体化技术在南阳烟区的应用效果[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(12): 72-76.
- [52] Wu, Y., Li, X., Zeng, H., Zhong, X. and Kuang, S. (2024) Analysis of Carbon Sink Benefits from Comprehensive Soil and Water Conservation in the Loess Hilly Gently Slope Aeolian Sand Region. *Water*, **16**, Article No. 3434. <https://doi.org/10.3390/w16233434>
- [53] Solaiman, Z.M., Shafi, M.I., Beamont, E. and Anawar, H.M. (2020) Poultry Litter Biochar Increases Mycorrhizal Colonisation, Soil Fertility and Cucumber Yield in a Fertigation System on Sandy Soil. *Agriculture*, **10**, Article No. 480. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100480>
- [54] 杨永锋, 张子颖, 刘国顺, 等. 高碳基肥料配施绿色木霉对烤烟香气品质的影响[J]. 烟草科技, 2020, 53(3): 27-35.
- [55] 张子颖, 许家来, 李现道, 等. 绿色木霉配施高碳基肥料对烤烟生长及经济效益的影响[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(5): 79-86.
- [56] 黄占斌, 郝文静, 冯泽坤, 等. 腐植酸在土壤改良和污染修复中的应用现状及研究展望[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 354-361+376.