

DOI: 10.20103/j.stxb.202304050686

贾振江, 刘学智, 李王成, 刘巧玲, 陈继虹, 姚晓翠, 徐天渊. 旱区连作砂田土壤质量和土地生产力演变与调控研究进展. 生态学报, 2024, 44(5): 2136-2148.

Jia Z J, Liu X Z, Li W C, Liu Q L, Chen J H, Yao X C, Xu T Y. Evolution and regulation of soil quality and land productivity in continuous cropping gravel-sand mulched field in arid region: progress and perspective. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 2136-2148.

## 旱区连作砂田土壤质量和土地生产力演变与调控研究进展

贾振江<sup>1</sup>, 刘学智<sup>1,2</sup>, 李王成<sup>1,2,3,\*</sup>, 刘巧玲<sup>1</sup>, 陈继虹<sup>1</sup>, 姚晓翠<sup>4</sup>, 徐天渊<sup>5</sup>

1 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021

2 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021

3 省部共建西北土地退化与生态恢复国家重点实验室, 银川 750021

4 南京林业大学生命科学学院, 南京 210037

5 陕西省水利电力勘测设计研究院, 西安 710001

**摘要:** 砾石覆盖在改变旱区水文循环和物质转化方面有着至关重要的作用。然而, 长期连作给砂田土壤质量及土地生产力带来危机和不确定性。以连作砂田为研究对象, 归纳总结了连作年限对砂层质地结构、土壤物理结构、土壤水盐热效应、土壤养分状况、土壤酶活性、土壤微生物特性、作物生长发育以及产量品质的影响效应和可能机制, 发现砂田土壤生态环境和土地生产力在人类活动及自然侵蚀的扰动和破坏下整体呈现退化态势, 但对不同覆盖条件、施肥水平和种植结构等农田管理措施的响应过程表现出差异性。继而, 基于土壤质量和土地生产力的协同和互作效应深入揭示了砂田性能逐年退化机理, 并简述了生物、农业及工程调控措施在砂田退化阻控和修复方面的应用进展。在此基础上, 提出了砂田退化进程中急需解决的关键科学问题和未来发展方向, 主要包括土壤质量演变的基本过程及其发生机制、“砾石-土壤-微生物-植物”系统的叠加和互作效应及其分子机理、土壤改良与生物防治措施的定量化及其调控机制三个方面。在气候变化、植被演替和土地退化背景下, 废弃风化砾石的劣化增肥机制及其环境效应将是今后研究的重点。

**关键词:** 砂田; 连作; 土壤质量; 土地生产力; 调控

## Evolution and regulation of soil quality and land productivity in continuous cropping gravel-sand mulched field in arid region: progress and perspective

JIA Zhenjiang<sup>1</sup>, LIU Xuezhi<sup>1,2</sup>, LI Wangcheng<sup>1,2,3,\*</sup>, LIU Qiaoling<sup>1</sup>, CHEN Jihong<sup>1</sup>, YAO Xiaocui<sup>4</sup>, XU Tianyuan<sup>5</sup>

1 School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China

3 State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China

4 School of Life Science, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

5 Shaanxi Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Research Institute, Xi'an 710001, China

**Abstract:** Gravel mulching, a special insulation, has been regarded as an indigenous agricultural technique in the arid and semi-arid areas of northwest China, was used to retain soil moisture and elevate soil temperature by retarding the diffusion of

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52169010); 国家重点研发计划项目(2021YFD1900600); 宁夏自然科学基金重点项目(2021AAC02008); 宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2021A03)

**收稿日期:** 2023-04-05; **网络出版日期:** 2023-12-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liwangcheng@126.com

water vapor and energy exchange through mulching on surface soil. Also, gravel have the potential to improve soil nutrient environment through promoting internal deterioration under continuous seasonal freeze-thaw drying and wetting effects. However, large portion of the gravel layer is intermixed with varying amounts of soil due to the prolonged tillage, unreasonable irrigation and wind erosion. These changes will result in the destruction of mulch textural composition and an increase in the invalid loss of soil moisture and nutrients. As such, the sustainability of gravel-sand mulched field is experiencing a crisis of negative economic returns and energy use. In this study, the effects and possible mechanisms of continuous cropping on gravel layer structure, soil physical structure, soil water-salt-heat, soil nutrient status, soil enzyme activity, soil microbial characteristics, crop physiological characteristics, yield, and quality were systematically addressed, aiming to provide reference and inspiration for the healthy and sustainable development of gravel-sand mulched field as well as ecological environment protection in the arid and semi-arid areas of northwest China. We found that the soil ecological environment and land productivity in gravel-sand mulched field have generally shown a degradation trend under the disturbance and destruction of human activities and natural erosion, but the responses process to farmland management measures, including different mulch conditions, fertilizer levels, and planting structures have shown differences. Subsequently, the degradation mechanism of continuous cropping gravel-sand mulched field was deeply studied based on the synergistic and interactive effects of soil quality and land productivity, and the biological, agricultural, and engineering regulation and control measures for the degraded gravel-sand mulched field were briefly discussed. Lastly, the key scientific problems, future development directions and proposals that need to be solved in the degeneration process of gravel-sand mulched field were provided. It mainly includes the basic process and mechanism of soil quality evolution, the superposition and interaction effects of gravel-soil-microbial-plant system as well as its molecular mechanism, and the quantification of soil improvement and biological control measures as well as their regulation mechanisms. Notably, with the global climate change, vegetation succession, and land degradation, the mechanisms of cracking and fertilizing of waste weathered gravel as well as its environmental effects will be the focus of future research.

**Key Words:** gravel-sand mulched field; continuous cropping; soil quality; land productivity; regulation

旱区降雨稀少,蒸发强烈,当地劳动人民因地制宜,将 10—15 cm 厚的砂砾混合物覆盖于地表以改善土壤特性。相关研究表明<sup>[1-4]</sup>,土表覆砂具有保温增渗、减蒸保墒、压碱抑盐、提产增效等功效,这一独特的农业节水保护性耕作栽培模式被广泛应用于我国甘肃、宁夏、新疆、青海等地及世界其他干旱半干旱地区。然而,在实际农业生产过程中,由于长期不合理灌溉、种植结构单一、风化作用及机械碾压等因素,紧密的砂石产生分散趋势,地表覆盖物常以砂土混合的形式存在,这使得砂层质地结构和土壤生态环境出现劣势化发展<sup>[5-6]</sup>。土壤质量退化是砂田土地生产力下降的基本特征,而土壤物理、化学及生物学过程决定其发展方向<sup>[7]</sup>。众多研究显示<sup>[8-9]</sup>,连作是砂田土壤质量逐年恶化的关键诱因。伴随种植年限的增加,土壤质地结构恶化、蓄水保墒性能减弱、潜在养分消耗殆尽、土壤酶活性降低、微生物群落结构失衡、作物病虫害频发,致使砂田土地生产力持续下降,大量老化砂田被撂荒。以宁夏环香山地区为例,预计至 2037 年左右,该地区的退化砂田面积将超过  $1.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,当地压砂地面临土壤沙化、地力衰退、作物减产、生态恶化等危机<sup>[10]</sup>。

土壤质量直接关乎农业生产结构、布局和效益<sup>[11]</sup>。目前,学者们针对砂田连作引发的退化问题已开展大量理论与试验研究,并从土壤物理、化学、生物特性等多角度剖析了影响其生态功能和土地生产力的关键障碍因子。然而,基于连作砂田退化机制和调控模式的系统总结和梳理仍十分有限。鉴于此,本文结合现有研究成果和实践经验,旨在详细综述砂层结构、土壤质量和土地生产力在长期连作下的演变特征,全面揭示砂田退化发生机理;同时,对退化砂田的修复与调控技术进行系统论述,并针对性提出其未来发展方向与研究重点,以期旱区农业健康可持续发展及生态环境保护提供参考和启迪。

## 1 连作对砂层质地结构的影响效应

砾石是指粒径 $>2\text{ mm}$ 的矿质颗粒。砾石覆盖层作为土壤的特殊保护屏障,其自身质地结构深刻影响土壤理化特性<sup>[12]</sup>。一般认为,连作年限是造成砂田地表覆盖物中不同粒径砾石占比具有空间异质性的主要因子<sup>[13]</sup>。在长期的犁耕碾压和风蚀雨刷过程中,砾石层受到大粒径砾石破碎和下层土壤颗粒混入的双重作用<sup>[14]</sup>,致使其砾石占比显著下降,粗砂(2.0—0.2 mm)和细砂(0.2—0.02 mm)比重不断提升<sup>[15]</sup>,即为砂田退化最直观的表现。许强等<sup>[8]</sup>通过对宁夏环香山地区不同种植年限压砂地覆砂层取样调查发现,砂田在连作17年后,覆盖层中含土量可由第1年的9.24%增加为36.15%,土砂比则由0.10提升至0.57。同时,诸多实践表明<sup>[16-17]</sup>,砂层含土量与连作年限呈线性正相关。若混入土壤超过2/3,砂田的减蒸保墒功效也将基本丧失<sup>[18]</sup>。此外,需要特别指出的是,砂土混合界面的模糊亦使得砾石覆盖层厚度逐年变薄,砂土混合层位置发生上移(图1)。已有研究发现<sup>[17]</sup>,40年砂田的平均砂层厚度仅为5.5 cm,年均可减少0.12 cm。

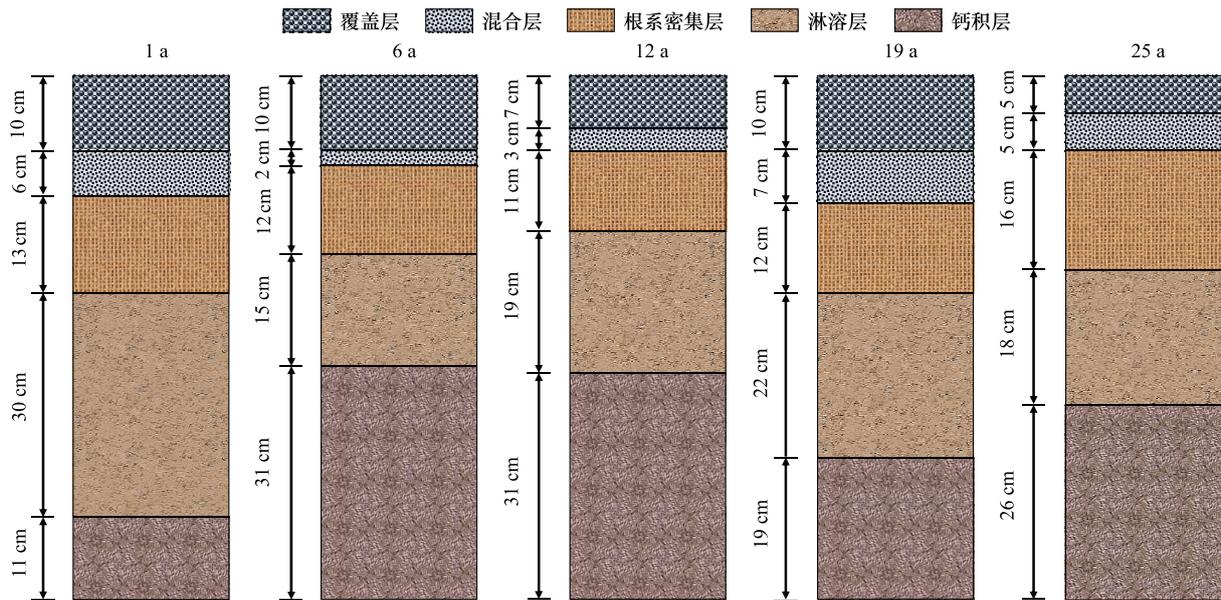


图1 不同连作年限下的砂田剖面构型示意(根据文献[19]重绘)

Fig.1 Soil profile for gravel-sand mulched field under different continuous cropping years (Redraw according to reference [19])

总体而言,连作将显著提升砂层土砂比,加剧砾石覆盖层与下层土壤连通性,严重制约其增温保墒功效。然而,目前尚不确定的是,除物理风化与人为干扰外,砂土混合界面处土壤微生境中的相关生物化学反应是否也会对砾石的裂解提供支持?因此,今后在深入研究连作对砾石覆盖层的作用机制时,还需充分考虑内在因素与外部因素的综合影响效应,继而明晰其内在驱动机制与作用路径,并进一步量化它们对砂层质地结构破坏的相对贡献。

## 2 连作对砂田土壤质量的影响机制

### 2.1 土壤物理性质

#### 2.1.1 土壤物理结构

土壤物理结构能够综合反映土壤结构体种类、数量及孔隙状况等基本特性,是决定土壤水、肥、气、热传输的介质基础。砂田在连作后,表层土壤(0—20 cm)结构特性均表现出不同程度响应,土壤理化性质不断恶化。资料显示<sup>[20]</sup>,由于长期的人为翻耕和雨水冲刷,砂田表层土壤质地随种植年限的延长不断粗化,砂粒含量连年增加,年均增长1.61%,粉粒与黏粒占比则持续下降。而土壤机械组成的分选在加剧土壤沙化、硬化和

板结的同时,还将深刻影响表层土壤团粒结构的形成、分布与转化。相关研究发现<sup>[21]</sup>,10年以内的砂田表层土壤主要以大团聚体(>5 mm)为主,10年以上砂田中则是微团聚体(0.05—0.25 mm)占优;同时,大团聚体的破裂和土壤微生境的失衡造成有机碳的物理保护缺失和代谢能力持续减弱,致使其储量亦逐年降低。这不仅归因于人为耙砂或犁耕的长期机械碾压破坏。更为重要的是,常年连作使得砂田土壤中富含的大量营养组分持续流失且又难以获得有机肥的有效摄入和补充,进一步阻控其形成的物质来源,严重制约团聚体的固存和稳定。事实上,砂土混合的发生还对土壤容重增加和孔隙度降低起到正向效应<sup>[6]</sup>。田间取样结果显示<sup>[7]</sup>,土壤容重及孔隙度分别在时间尺度上表现为在波动中上升和下降的趋势,土壤紧实度增加而通气透水性下降,且不同深度土层间均存在垂直差异。

### 2.1.2 土壤水盐热效应

土壤含水量是表征土壤水分状况的重要状态指标。众多研究表明<sup>[6-7,11]</sup>,表层土壤持水性能在连作3—5年间状况最佳。这是因为,砾石覆盖层在覆砂初期阻断土壤表面与大气的直接接触,大幅减弱土壤水汽与外界的能量交换<sup>[22]</sup>;同时,较大的砾石孔隙结构亦能够显著抑制土壤产流发生并促进水分的垂直入渗<sup>[23]</sup>,这使得表层土壤能够贮存较多水分并逐年累积<sup>[5]</sup>。但随着连作年限的增加,覆盖层中土壤占比持续提升,砂层截流持水性能增强的同时<sup>[15]</sup>,蒸发锋亦移位土壤表层,致使含水量峰值下移,干燥化速率加快<sup>[24]</sup>。研究发现<sup>[8]</sup>,当砂田覆盖层的土砂比从0.09增至0.57时,表层土壤含水率可由25.30%降至13.70%;而连作16年的砂田土壤干层厚度相比3年可增加253.33%,其平均含水量则降低5.83%,土壤水分亏缺严重<sup>[25]</sup>。

砂田土壤盐分运移与水分运动相辅相成,遵循“盐随水动”的同步性准则<sup>[22]</sup>。微咸水补灌<sup>[26]</sup>、砾石中离子析出<sup>[27]</sup>及钙积层蓄积<sup>[19]</sup>(图1)是其运移和重分布的主要物质来源。伴随种植年限增加,深层土壤可溶性盐分以水分为载体,由蒸发驱使聚集至土壤表层,特别是砂土混合界面<sup>[26]</sup>,且返盐效应随覆盖层结构恶化而愈加强烈<sup>[24]</sup>。相关研究表明<sup>[9,28]</sup>,连作1—3年的表层土壤全盐量较裸露农田显著降低,3年以后则基本呈上升趋势且土壤pH值持续增加。然而,由于砂田的逆向演替<sup>[29]</sup>、降雨或灌溉淋洗<sup>[24]</sup>和作物生理代谢影响<sup>[3]</sup>,覆盖层在一定连作年限内仍可维持压碱抑盐效果,表层土壤返盐效应往往具有时滞性<sup>[6]</sup>。如赵文举等<sup>[29]</sup>通过实地取样调查发现,中砂田(25—30年)的盐碱化程度最轻,其表层土壤全盐量仅为新砂田(<10年)的94%,老砂田(45—60年)的盐碱化程度最为严重。相应的,表层土壤pH则呈先降后升态势<sup>[30]</sup>。

砂田土壤温度受连作影响深刻,砂田地温随种植年限的增加呈阶段性变动<sup>[17]</sup>。近年来的一项研究基于多年Landsat卫星数据将旱区连作砂田的地温演变过程划分为3个阶段<sup>[10]</sup>,即纯砾石阶段(P1)、砂土混合阶段(P2)和砂土连通阶段(P3)。砾石覆盖被认为是一种有效的温度调节方式。当砂田处于P1阶段(<5年)时,比热容小且导热性差的砾石特性使得覆盖层上下热空气的乱流交换受阻,而地表净辐射通量骤增<sup>[31]</sup>。值得注意的是,此时的覆盖层表面温度虽有提升,但其只能以热辐射和空气对流方式向下层土壤传输能量,这使得土壤表面温度上升缓慢且维系时长较短<sup>[10]</sup>。当砂层中的土壤占比持续升至某一临界值时,砾石间大空隙逐渐被土壤填充,且随蒸发的持续发生,砂土结合愈加紧密,其增温隔热效果反而凸显<sup>[5]</sup>。因此,P2(5—20年)则成为砂田发挥保温效应的主要时段。而当连作年限介于P3,即25—30年时,退化的砂土混合结构在显著降低下垫面净辐射通量的同时,亦同步增强覆盖层与下层土壤的连通性,大幅减弱其对土壤“水通道”和“热通道”的隔绝作用。此时,大范围的地表覆盖物直接进行潜热交换,其增温保温功效基本丧失<sup>[16]</sup>。

## 2.2 土壤化学性质

连作对砂田土壤养分管理和肥力退化具有不同的正负效应。诸多研究证明<sup>[6-7]</sup>,砂田土壤养分对连作的响应机制并非简单促进或抑制,而是因养分类型和连作年限而异。进一步的报告显示<sup>[8,11,20,32]</sup>,氮(N)、磷(P)、钾(K)等表层土壤营养元素随连作年限呈现先增加后衰减的趋势,且其在4—5年间含量最高,而至5—7年时降幅最为明显;表层土壤硒(Se)含量则在3—5年达到极值,10年时状况最差,上述规律已在宁夏环香山地区的连作砂田中得到进一步验证<sup>[33-34]</sup>。除铺砂前基肥施用的影响外,这亦归因于“砾石-土壤”系统中化学元素演变的继承性。暴露于土壤表面的风化砾石在历经长期的干湿交替、冻融循环和灌溉淋溶作用后,N、

P、K、钙(Ca)等大量元素和铁(Fe)、锰(Mn)、硼(B)、Se等微量元素从中释放并迁移至土壤表层富集<sup>[35]</sup>,而砂田的增温保墒特性进一步加速其矿化过程,土壤养分环境在一定年限内被明显改善。但随着覆盖层中砾石占比的不断减少,元素淋失量达到峰值,其析出、吸附及沉淀过程放缓并逐渐趋于平稳<sup>[36]</sup>,致使根系密集层下限不断上移<sup>[19]</sup>(图1)。同时,由于砾石层的阻隔,地上凋落物难以到达土壤表层,加以砂田追肥困难,作物生长发育只能依靠有限的潜在土壤养分,使得土壤有机质(SOM)和有机碳(SOC)等营养物质亏缺或失衡<sup>[21,28]</sup>。此外,值得特别注意的是,由于作物根系对矿质元素的选择性吸收特性,长期连作必将导致铅(Pb)、砷(As)、镓(Ga)、铍(Be)等经由砾石释放的毒性元素在土壤中的沉降和富集<sup>[35-36]</sup>,这可能致使其重金属含量超标并对土壤微生态环境产生不可逆损害。因此,持续开展对连作砂田土壤污染物来源的识别、鉴定、解析及其健康风险评价极为必要。

但也有研究得出不同的结论<sup>[9,29,37-38]</sup>,认为连作对砂田土壤养分均为单一抑制效应或部分无显著影响。连作过程中土壤基础养分含量的冗余或贫乏,与砂田本身的覆盖类型、耕作性质、种植结构以及田间管理方式等密切相关<sup>[6]</sup>,特别是砾石自身化学成分和风化程度的异质性不可忽视<sup>[36]</sup>。这种不同类型养分间的差异性变化可为退化砂田平衡施肥与分区治理方案的科学制定指明方向。

## 2.3 土壤生物性质

### 2.3.1 土壤酶活性

土壤酶类承担植物根际微环境中有机物和腐殖质等营养物质的形成、分解和转化功能,是土壤质量和肥力水平的生物学表征。当前的研究结果显示<sup>[28]</sup>,受气候环境、空间分布、土壤类型、水热条件、养分含量以及人为干扰等的影响,连作对砂田相关土壤酶活性的作用结果不一。在邱阳等<sup>[39-41]</sup>的调查中,连作下的土壤酶活性介于未覆砂农田和撂荒地之间,且均随连作年限呈现先增加后减少趋势。其中,多数土壤酶(蔗糖酶、脱氢酶和多酚氧化酶)在10—11年间最为稳定;部分土壤酶(淀粉酶和过氧化氢酶)则在2—4年内达到最优。而贺婧等<sup>[42]</sup>研究发现,土壤酶活性(脲酶、磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶)对连作时长的响应规律基本一致,在1—10年内表现为先降低后升高态势,至3—4年时为最低,且始终小于未压砂土壤。此外,也有部分学者认为<sup>[7,11,43-44]</sup>,土壤酶活性(脲酶、磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶)随连作年限延长均表现出不同程度下降,并将其主要归因于土壤物理性状和养分有效性的持续恶化以及微生物群落组成和代谢功能的退化。

综上,从现有报道来看,相较于裸土,连作对砂田土壤酶活性具有显著抑制效应,并间接反映了土壤C、N和P等营养组分的演替方向<sup>[20]</sup>。然而,连作下的土壤酶活性表现出相对复杂的变化,其与连作年限间缺乏明确的定量关系。同时需要指出的是,不同种类土壤酶对连作的差异性表达机制目前尚不明晰,特别是它们与根际土壤微生物的互作关系还有待从多组学层面对其进行深入分析和阐明。

### 2.3.2 土壤微生物特性

微生物是土壤生态环境的重要组分,可通过其种类、数量和分布来综合反映土壤质量。越来越多的研究表明<sup>[45-46]</sup>,土壤微生态失衡,特别是微生物群落结构、功能以及物种多样性的恶化是连作砂田地力贫瘠和作物减产的主要原因。常年连作致使土壤微生物区系失调,具体表现为病原微生物的生长与聚集加剧,而有益微生物的繁殖和代谢受限<sup>[47]</sup>,细菌与真菌生物量比值显著减小<sup>[43]</sup>,土壤微生物量碳、氮和磷的转化利用能力<sup>[41]</sup>及土壤呼吸强度<sup>[48]</sup>大幅下降。连作下的砂田土壤逐渐由细菌型向真菌型演变,真菌富集成为其连作障碍发生的重要表征<sup>[30]</sup>。值得注意的是,除机械作业可能导致的碾压破坏外,长期连作对土壤细菌和真菌组成并无直接作用,而是主要通过影响土壤环境来改变根际土壤微生物群落结构,包括土壤酸碱性、水热条件和营养状态等<sup>[49]</sup>;且相较于根际真菌,连作对土壤中细菌群落的影响更大。这不仅是因为真菌比细菌具有更强的有机质降解能力<sup>[50]</sup>,更为重要的是,土壤真菌还可以通过与作物共生来保持群落稳定性<sup>[51]</sup>。因此,细菌对土壤基质的耐受性和适应性就显得更为敏感,且在土壤剖面中存在明显分层现象<sup>[49]</sup>。相关研究显示<sup>[33-34]</sup>,多年连作后的砂田根际土壤细菌种群中的优势类群面临数量骤减、结构单一以及多样性降低的困境,包括放线菌门(*Actinobacteria*)、变形菌门(*Proteobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、酸杆菌门(*Acidobacteria*)及厚壁菌门

(*Firmicutes*)等;与之相对应的,少数有益真菌和多种病原菌则在长期连作过程中以菌丝和分生孢子的存在形态在植物残骸或根际土壤里被大量衍生,主要有被孢霉属(*Mortierella*)、绿僵菌属(*Metarhizium*)、假霉样真菌属(*Pseudallescheria*)、镰刀菌属(*Fusarium*)和青霉属(*Penicillium*)等。其中,被孢霉属为砂田连作进程中的主要真菌优势类群<sup>[47]</sup>,而瓜拟多隔孢菌(*Stagonosporopsis cucurbitacearum*)则被鉴定为晒砂瓜叶疫病的主要致病菌<sup>[52]</sup>。值得特别关注的是,由于不同病原菌自身作用或与细菌类群间的互作效应影响<sup>[33]</sup>,作为诱发晒砂瓜枯萎病的镰刀菌属在根际土壤微生物群落中却并不占优<sup>[30]</sup>,其丰度在连作 10 年时即可到达峰值。此外,最新的研究进一步发现<sup>[47]</sup>,连作 16 年的砂田根际土壤中富集有大量未明确分类的真菌类群,而这则可能与作物根系分泌或残渣分解释放的化感物质的选择性塑造相关<sup>[53]</sup>。

总的来看,当前土壤微生物对砂田连作的响应研究多数停滞在外界环境扰动下的关键物种地理分布格局变化。关于连作对砂田土壤功能菌群间互作关系及其介导的土壤养分循环过程,特别是对根际土壤中原生动物的生态功能以及微生物分子生态网络的影响机制研究仍十分匮乏,还需大量数据积累及实验验证。

需要进一步注意的是,现阶段关于连作砂田土壤质量的报道多以耕层土壤(0—20 cm)为研究对象,而常常忽视深层土壤,特别是亚耕层(20—40 cm)及以下(>40 cm)的土壤生态过程及其与连作年限间的响应关系。未来研究应重点关注砂田表层以下土壤的物理结构形态、元素迁移路径以及微生物区系特征,以充分考察深层土壤微生境与植物根系分布间的互馈调节机制。此外,以往相关研究往往仅考虑特定或独立的土壤特性演变。事实上,各土壤要素间通常相互影响、相互制约、相互作用。因此,深入揭示其内在关联与耦合效应对于进一步明晰砂田退化发生机理具有重要理论与实践意义。

### 3 连作对砂田作物生长发育和产量品质的影响效应

晒砂瓜(*Citrullus lanatus*)作为压砂地集中分布区的主要经济作物之一,因其营养丰富、细嫩多汁和甘甜爽口而闻名<sup>[54]</sup>。其中,宁夏环香山地带作为晒砂瓜的主产区,现有种植面积将近  $6.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ <sup>[10]</sup>。然而,常年连作加剧砂田土壤质量退化,特别是根系土壤微生物群落制衡环境的破坏<sup>[33-34]</sup>,致使作物生理生化和代谢水平受限,病害加重,最终造成其产量和品质的逐年降低,已成为当地特色经济产业可持续发展的瓶颈问题。诸多研究表明<sup>[3,9,17,30,48,54-55]</sup>,连作下的旱区晒砂瓜生育期明显延长,特别是出苗坐果时长差异显著,其生理特性,包括主蔓长、叶片数和叶面积指数等远不及覆砂早期,产量、品质和水分利用效率亦随种植年限的增加而显著下降。晒砂瓜在连作前 10 年内能够维持较高产量和品质,20 年以后则不及最高值的 50%,这同土壤肥力对连作年限的响应结果基本一致。

除土壤结构、养分状况和微生态环境外,土壤酸碱性及水热性能也是影响砂田作物生长发育和产量品质的关键非生物性限制因子<sup>[45]</sup>。这主要有两方面的影响。首先,适当的土壤酸碱度调节、干旱逆境和热量积蓄对作物生长发育起到积极的正向效应。然而,深度的盐碱、干旱和低温胁迫在减弱根际土壤有益微生物和酶活性的同时<sup>[30]</sup>,亦使得土壤系统中的有效养分供给受限,植物体内稳态环境失衡,根系持续发生渗透胁迫甚至引发离子毒害效应<sup>[56]</sup>,致使作物生长失调或受损,果实产量和品质下降。已有研究发现<sup>[3]</sup>,非盐碱性砂田的土壤盐分在长期种植过程中于作物根系层发生累积并逐渐逼近晒砂瓜的耐盐耐碱阈值,其果实产量随连作年限呈现开口向下的二次抛物线变化,7 年左右即可发生连作障碍。而在连作 10 年之后,晒砂瓜中的可溶性固形物、维生素 C 和糖含量降幅明显,果实中硝酸盐含量则持续增加,这使得其风味品质、营养品质和储藏品质等性能逐年变劣<sup>[17,54]</sup>。

值得注意的是,化感自毒作用亦是造成晒砂瓜连作障碍的不可忽视的重要原因。化感物质即为植物通过根系分泌或残体分解等途径向土壤微环境中释放的次生代谢物质<sup>[57]</sup>。研究显示<sup>[58]</sup>,压砂作物,特别是晒砂瓜,在常年连作下易造成酚酸、有机酸和氨基酸等化感物质于根-土界面处过量累积,使得土壤 pH 降低和酶活性下降,诱导并加剧以尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)为主的病原微生物的促生与激增。同时,它还可以通过损伤细胞结构、影响植物激素合成和细胞新陈代谢进一步抑制种子萌发和胚芽生长<sup>[45,59]</sup>。而受自毒作用



或间接性的持续损害。

## 5 退化砂田的修复与调控

社会经济发展和土地资源保护间的矛盾,已成为现阶段砂田产业高效、优质、绿色和可持续发展过程中的主要障碍。因此,探索发展退化砂田生态修复和地力提升的综合技术与集成模式刻不容缓,是解决其生产和环境问题的有效途径。砂田生态系统的恢复与调控,即是借助物理、化学和生物学等方式对土壤地理环境、根际微生物群落及作物生长过程进行综合管理和健康调节,详见图 3。

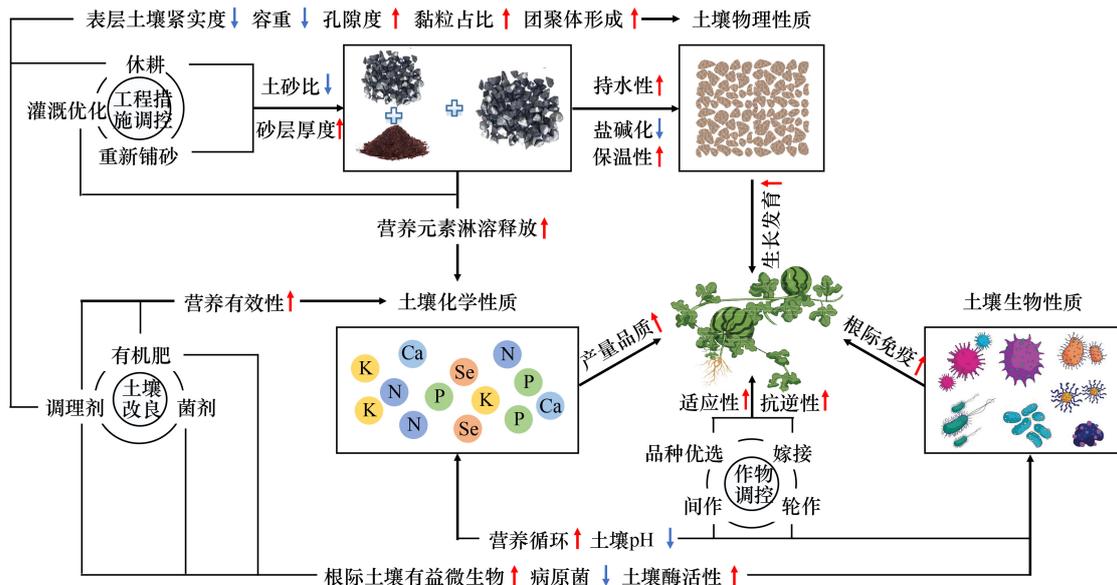


图 3 退化砂田修复与调控模式示意

Fig.3 Restoration and regulation modes for degraded gravel-sand mulched field

### 5.1 生物调控

土壤微生物作为退化土地修复的变局者,直接管控有机物形成、分解和碳氮循环过程<sup>[62]</sup>。因此,开发应用绿色环保、环境友好的新型生物技术用以调控根际微生物间的互作关系,重塑土壤微生物群落,激发有益生态集群活性,协同抑制病原菌的定殖增长则成为抵御土传病害的新策略<sup>[63]</sup>。目前的研究表明<sup>[64-65]</sup>,微生物菌剂的科学合理施用是改善土壤微生态环境、提高根际群落免疫和减缓连作障碍的有效生物途径,其核心主要通过分泌植物生长素或抗生素来提高土壤养分有效性,强化植物的抗逆、抗病和耐受能力以减轻病害、干旱及盐碱胁迫的负面影响。通常,有益微生物,特别是根际促生菌(PGPR),被用来制备微生物肥料以发挥其在特定作物和耕作环境中的生态驱动效应。进一步的报告显示<sup>[66-67]</sup>,硒砂瓜根际土壤中存在 11 株兼具产铁载体、解磷和促生特性的优良土著促生菌株。其中,就促生效应而言,芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、肠杆菌属(*Enterobacter*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)以及变形杆菌属(*Proteus*)对硒砂瓜幼苗的促生效果最佳。而在实际生产实践中,含有哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)和枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)的复合微生物菌剂在连作砂田中的配施对硒砂瓜生长和产量均具显著促进效应<sup>[68]</sup>。然而,当前的难点在于无法确定接种剂中的微生物,特别是外源促生菌在连作砂田土壤微生态环境中的适应性和稳定性。因此,未来应持续强化对根际促生菌生防潜力的挖掘,并进一步开展优良土著微生物的分离、筛选、鉴定、试验及其在实际农业生产过程中的推广应用。

### 5.2 农业调控

#### 5.2.1 调整优化作物种植结构

合理调整优化作物种植结构,推行绿色发展的生态农业种植模式,对于平衡土壤生物多样性、提升农业土

壤健康水平至关重要<sup>[69]</sup>,被认为是解决砂田单作和连作障碍的重要农业调控措施<sup>[45]</sup>。其中,作物轮作及间作作为高效管理和利用生物资源的传统栽培模式,具有调节微生物生态系统稳定性、增强土壤活力、营造土壤健康生境等优势<sup>[63]</sup>。据报道<sup>[48,70-71]</sup>,在以硒砂瓜为主的和甜瓜(*Cucumis melo* L.)或辣椒(*Capsicum annuum* L.)的轮作和间作系统中,砂田中“植物-土壤-微生物”的动态平衡关系被重构,相关土壤酶和有益菌等微生态因子的活性、结构及代谢功能被显著提高,土壤物理性状和养分状况被明显改善,作物的抗病性能和产出效能因此凸显。此外,作物嫁接移植技术亦被证明是退化砂田减损提效的有效手段<sup>[45]</sup>。诸多研究表明<sup>[72-75]</sup>,选用对硒砂瓜尖孢镰刀菌专化型(*F. oxysporum* f. sp. *niveum*)具有较强免疫能力的南瓜(*Cucurbita moschata*)或瓠瓜(葫芦)(*Lagenaria siceraria*)等作为砧木与其进行嫁接,能够显著降低作物枯萎病的发生和蔓延,进而促进其生长发育和产量品质提升。其中可能的微生物生态学机制是,嫁接根苗分泌的某些自感物质对退化砂田中潜在的根际病原微生物的生长、富集、扩散和传播具有显著抑制和拮抗效应<sup>[47]</sup>。然而,轮作和间作模式,特别是嫁接技术对砂田连作障碍的缓解机制目前尚不明晰,其中的抗性分子机理还需深入探索。更为关键的是,受硒砂瓜有效种植面积缩减、作物生长周期延长以及砂田环境因素等的制约,上述农业种植和栽培技术在实际生产中的推广应用仍处于起步阶段。因此,在基于多组学联用强化其抗逆机制研究的同时,持续深入推进砂田农业种植布局优化和转型将成为未来研究的热点与重点。

### 5.2.2 培育抗性优良作物品种

作物品种的单一化对砂田生态环境和土地生产力构成潜在威胁。因此,通过开展作物抗逆应激机制、病原菌致病机理以及抗性基因表达等的研究和分析,引进或选育具有较强逆境适应性、耐受性、稳定性和抗病性且早熟、节水、优质、高产的种质资源成为缓解砂田连作障碍的重要农业调控方式<sup>[45]</sup>。近年来,我国研究人员在沙漠风暴和金城5号等传统主栽品种的基础上,相继试验筛选出适宜西北旱区砂田种植的硒砂瓜优新生态型品种,主要包括“金城系列”中的16WMK467和18—64<sup>[76]</sup>;“宁农科系列”的杂交西瓜品种<sup>[77]</sup>,特别是“宁农科3号”;以及日本引进西瓜品种N-08<sup>[78]</sup>等。尽管如此,现阶段的硒砂瓜种间杂交、基因育种或品种引进仍面临作物生长适应性和产量品质难确定的风险和挑战。因此,后续的研究应重点关注硒砂瓜品种结构对不同区域气候和土壤环境的响应机制及其鉴定、调节和优化过程。

### 5.2.3 土壤改良与修复

增效剂和调理剂由于其对土壤结构、酸碱环境、养分供应和作物抗逆性等的改善及调节特性,被广泛应用于障碍土壤的改良与修复<sup>[79]</sup>。已有研究表明<sup>[80-81]</sup>,生物有机肥替代化肥配施是缓解由于长期化肥耨施和连作障碍导致的砂田土壤养分失调的重要途径和科学方案,其在摄入补充作物必要养分和微量元素的同时,自身所携带的功能微生物亦对砂田生态系统在逆境中的缓冲、适应和恢复能力提升具有潜在意义。然而,相较于单施有机肥或化肥,穴施有机肥混配菌剂的复合基质定植技术,更能有效改善砂田根际土壤微生物区系,增强土壤蓄水保肥性能,并显著提高硒砂瓜产量和品质<sup>[82-83]</sup>。此外,调理剂对连作砂田土壤的改良效果亦备受瞩目。如刘文辉<sup>[84]</sup>的研究曾指出,当生物质炭与有机肥的配施比为1:2时,砂田根际土壤生防菌,特别是哈茨木霉M3菌株在微生物种群中的竞争效应和拮抗作用则更易被激发,并能够对作物病害起到56.75%的防治效果。然而,值得注意的是,土壤改良剂可能引发的负面环境效应及其高额的生产成本不容忽视,它们在连作砂田土壤中的安全性、适用性、有效性及其种类、用量和施用方法的定量化仍需进一步因地制宜地开展试验、验证和评价工作。

## 5.3 工程调控

为遏制或缓解压砂地退化进程和困局,当地劳动人民常采取精耕细作或对使用年限久远,功能逐渐丧失的退化砂田进行重新铺砂的方式,以重塑其保墒性能,延长功能寿命<sup>[18-19]</sup>。然而,在实际农业生产过程中,砂田的翻新面临工作繁重,耗时耗力,且机械化耕作尚未全面实行的困境<sup>[16]</sup>。因此,针对上述问题,还需进一步力促免耕机械和农艺措施的有机结合,以减少对砂田的过度碾压。特别是对于果树和经济林木等多年生植物,覆砂后可避经常扰动之弊并兼顾生产、生态及社会效益,将成为优化砂田养护和耕作管理,推进旱区有机

农业可持续发展的关键举措和战略性模式<sup>[85]</sup>。此外,长期耕作后的适当休耕,亦对退化砂田生产、环境和生态功能的恢复与重建<sup>[86]</sup>,特别是对砾石覆盖层结构和土壤质量环境的改善<sup>[8,19]</sup>,具有正向调节效应,可作为砂田修复过程中的自然调控和生态管理途径。

尽管砂田的土壤墒情优于裸露土壤<sup>[14]</sup>,但当自然降水不足时,适当的补充灌溉是提高砂田生产效益的重要手段<sup>[87]</sup>。然而,传统的整田微咸水漫灌加剧砂土混合和土壤次生盐渍化的发生<sup>[24]</sup>。因此,集雨滴灌技术的应运而生可为退化砂田的节水抑盐、地力提升和增产提质提供全新的调控思路和模式借鉴<sup>[88]</sup>。而在气候变化、植被演替和土地退化背景下,基于区域生态健康和环境安全的基本前提,通过给水精量实施和灌溉方式优化<sup>[89]</sup>,同时,充分利用风化砾石崩解破碎和矿质元素淋溶释放对其粒径大小<sup>[14]</sup>和温差变幅<sup>[90]</sup>响应敏感的物理特性,以加速其成土化进程<sup>[27]</sup>并提升土壤肥力水平<sup>[35]</sup>,被证明是提高退耕压砂地生态枣林生态功能和经济效益的可行方案<sup>[31]</sup>。因此,在干旱少雨、地力贫瘠和生态脆弱并存的干旱半干旱地区,这一技术模式无疑是对砂田水土保持和资源高效利用的继承、创新和发展。然而,目前的相关研究多停留在风化砾石劣化及其元素淋溶的室内模拟阶段,其试验结果难以直接应用于复杂多变的田间生产,致使这一特殊的干湿交替灌溉模式的相关技术规范仍未有效形成,其中的具体技术参数仍难以确定。因此,后续应着力开展不同灌溉方式与定额、不同灌溉周期与频次下的最优模式筛选,并进一步进行多种作物横向对比,以实现上述新型高效的风化砾石田间处理模式和土地健康保育技术在旱区退化砂田中的推广应用。同时,需要进一步指出的是,即使现有手段已对砾石的风化进程进行一定程度加速,但其的劣化速率相较数量庞大的废弃规模以及作物生长发育过程仍显得十分缓慢和滞后。因此,能否充分借助作物根系分泌物及根际土壤微生物的剧烈生化作用,进一步创新风化砾石的富集深层还田技术,进而不断完善和发展综合地上物理风化技术与地下生化风化技术的砾石劣化增肥调控模式,将成为今后值得深入思考和突破的方向。

## 6 结论与展望

综上所述,连作加剧砂田土壤质量恶化、土壤生态系统失衡和土地生产力退化,其中涉及复杂的互馈和协同过程。现阶段,诸多学者围绕砂田土壤质量演变和连作障碍防控,全方位、多维度、深层次开展相关的系列研究并取得丰硕成果,涉及土壤学、水文学、植物学、生态学、工程学等多领域、多学科、多层次的效应分析和机理探究,但仍存在部分关键过程不清晰、演变长期效应不明确和综合调控模式不成熟等的不足和局限,缺乏动态化、量化、系统化的发展机理表征、科学诊断评价和生态修复技术。展望未来,为加强对旱区砂田退化发生机制的正确认识及合理调控,今后的理论与技术研究应强化拓展以下4个方面:

(1) 土壤质量演变的基本过程及其发生机制。土壤是维系生态环境稳定和健康发展的物质基础,其质量水平与砂田土地生产力密切相关。以往研究多集中于局域尺度内的连作砂田点位调查分析及其演变规律的定性描述,而常忽视砂田退化的形成原因、内在机理、发展态势和系统评价。因此,实施长期稳定、连续有效的区域定位研究和动态监测尤为关键。同时,还需充分发挥以人工智能方法和物联网技术为代表的新一代信息技术的支撑引领作用,进一步建立考虑下垫面空间变异性的砂田土壤时空大数据平台及其多维评价体系,以实现对其地力和主要障碍因子的快速诊断和科学评估。

(2) “砾石-土壤-微生物-作物”系统的叠加互作效应及其分子机理。不同于目前单向路径的退化机理研究,连作下的实际砂田土壤质量和土地生产力衰退是涵盖多因素、多体系相互作用以及能量循环和物质转化的复杂过程。其中各单元间的叠加、互作、协同作用机制及其对整体演化进程的响应关系与相对贡献值得进一步深入探析。特别是土壤根际微生物生态习性变化、酶活性演替和化感物质自毒效应,以及它们在环境胁迫下的感知应答机制,有待结合微生物生态学理论和多组学技术进行系统揭示和阐明。

(3) 土壤改良与生物防治措施的定量化及其调控机制。基于理论研究和实验分析,深入揭示各种修复技术和调控手段的障碍消减机制和地力提升机理,并探明它们在生态系统中的适应性、稳定性及其长期效应。同时,发展兼顾作物特性与土壤墒情的退化砂田管理模式,因时制宜、因地制宜地开展退化土壤改良和生态修

复试验工作,制定科学合理的区域化、量化的调控制度。进一步的,扩展和创新生物技术、信息技术、农业技术交融发展的调控新方法、新技术和新策略,特别是要推进相关作业机械的研制、改进和升级,以及综合防治技术模式的搭建、集成、应用和推广,以充分实现不同调控途径下的经济、生态和社会效益。

(4) 废弃风化砾石的劣化增肥机制及其环境效应。伴随砂田退化和弃耕的持续发生,遗留于土壤表面的废弃风化砾石成为亟待解决的环境难题。因此,通过某种特殊处理手段加以促进砾石破碎和元素释放,成为有效改善土壤养分环境的绿色、有机、高效和环保型调控技术。然而,值得进一步深思的是,实现其完全劣化、破碎及成土的科学途径和有效时长如何? 风化砾石成土化进程对元素淋溶、释放和迁移的作用机理如何? 矿质元素的释放和迁移,特别是毒性元素的富集是否影响原有土壤生境的稳定性、平衡性和酸碱性,进而加剧土壤重金属污染和次生盐碱化?

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Wang Y J, Xie Z K, Malhi S S, Vera C L, Zhang Y B, Guo Z H. Effects of gravel-sand mulch, plastic mulch and ridge and furrow rainfall harvesting system combinations on water use efficiency, soil temperature and watermelon yield in a semi-arid Loess Plateau of northwestern China. *Agricultural Water Management*, 2011, 101(1): 88-92.
- [ 2 ] Xie Z K, Wang Y J, Jiang W L, Wei X H. Evaporation and evapotranspiration in a watermelon field mulched with gravel of different sizes in northwest China. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1/2): 173-184.
- [ 3 ] 马中昇, 谭军利, 马小福, 魏童. 不同种植年限对压砂地土壤盐分及西瓜产量的影响. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(11): 1200-1204.
- [ 4 ] Wang D L, Feng H, Li Y, Zhang T B, Dyck M, Wu F. Energy input-output, water use efficiency and economics of winter wheat under gravel mulching in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 2019, 222: 354-366.
- [ 5 ] 贾振江, 刘学智, 徐天渊, 李王成, 刘巧玲, 陈继虹, 马波. 砂土混合覆盖下的土壤水分蒸发特性及其因子分析. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 227-236.
- [ 6 ] 王菲, 王建宇, 王幼奇. 宁夏荒地压砂年限与土壤理化性质研究. *北方园艺*, 2014, 38(13): 181-185.
- [ 7 ] 王超, 王菲, 吴秀玲, 王建宇. 压砂年限对土壤质量的影响研究. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(8): 190-195.
- [ 8 ] 许强, 吴宏亮, 康建宏, 强力. 旱区砂田肥力演变特征研究. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1): 37-41.
- [ 9 ] 王占军, 蒋齐, 何建龙, 马琨, 胡景田. 宁夏环香山地区压砂地土壤肥力特征分析. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 201-204.
- [ 10 ] 李王成, 王帅, 王兴旺. 砂田抑制蒸发功能随覆砂年限的演变规律. *灌溉排水学报*, 2019, 38(3): 83-89.
- [ 11 ] 王菲, 王建宇, 贺婧, 王幼奇, 王超. 压砂瓜连作对土壤酶活性及理化性质影响. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(5): 108-114.
- [ 12 ] Epstein E, Grant W J, Struchtemeyer R A. Effects of stones on runoff, erosion, and soil moisture. *Soil Science Society of America Journal*, 1966, 30(5): 638-640.
- [ 13 ] 阮晓晗, 白一茹, 王幼奇, 高小龙. 基于地理探测器和 GIS 的压砂地砾石空间异质性及其影响因素分析. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(1): 178-187.
- [ 14 ] 刘民安, 董亚萍, 李晨, 李王成, 李于坤, 马己安, 高海燕, 郝璐. 冻融干湿循环条件下压砂砾石损伤过程. *农业工程学报*, 2021, 37(1): 176-187.
- [ 15 ] 谭军利, 王西娜, 田军仓, 王玉龙, 朱勇静. 压砂地砂层持水特性研究. *土壤通报*, 2017, 48(2): 319-325.
- [ 16 ] 王金牛, 谢忠奎, 郭志鸿, 王亚军. 砂田退化对土壤温度和蒸发影响的模拟研究. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 388-393.
- [ 17 ] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 覆砂年限对砂田砂层质量、土壤水热状况及西瓜生长的影响. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1433-1439.
- [ 18 ] 杜延珍. 砂田在干旱地区的水土保持作用. *中国水土保持*, 1993(4): 36-39.
- [ 19 ] 逢蕾, 肖洪浪, 路建龙, 周茂先, 谢忠奎, 李彩芝, 赵良菊, 柴守玺, 常磊, 任娟. 干旱半干旱地区砂田结构及水分特征. *中国沙漠*, 2012, 32(3): 698-704.
- [ 20 ] 王超. 连作砂田土壤质量演变研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [ 21 ] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 不同年限旱砂田土壤团聚体及其有机碳分布特征. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1619-1625.
- [ 22 ] 王平, 谢成俊, 陈娟. 不同种植年限砂田水盐变化与砂田退化初探. *水土保持通报*, 2012, 32(2): 251-254.
- [ 23 ] 郑飞龙, 王西娜, 葛敏, 李存云, 谭军利. 压砂条件下灰钙土地区农田土壤水分垂直入渗特征研究. *土壤通报*, 2021, 52(2): 314-321.
- [ 24 ] 徐天渊, 贾振江, 李王成, 赵广兴, 高海燕, 王洁, 赵相宇. 宁夏中部干旱带微咸水灌溉对砂土混合覆盖下土壤水盐运移的影响. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(5): 138-144.
- [ 25 ] 赵云鹏, 白一茹, 陆学娥, 张兴, 包维斌, 王幼奇. 宁夏不同种植年限下晒砂瓜土壤干燥化效应研究. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 273-279.

- [26] 谭军利, 王西娜, 田军仓, 苏小林. 不同微咸水灌水量条件下覆砂措施对土壤水盐运移的影响. 农业工程学报, 2018, 34(17): 100-108.
- [27] 穆敏, 李王成, 王洁, 刘巧玲, 董亚萍, 安文举. 宁夏中部干旱带粗颗粒土裂化过程研究. 东北农业大学学报, 2022, 53(6): 88-96.
- [28] 胡景田, 马琨, 王占军, 何建龙. 荒地不同压砂年限对土壤微生物区系、酶活性与土壤理化性状的影响. 水土保持通报, 2010, 30(3): 53-58.
- [29] 赵文举, 唐学芬, 范严伟, 郁文. 压砂地土壤盐分演替特征研究. 灌溉排水学报, 2017, 36(8): 25-31.
- [30] Gu X, Yang N, Zhao Y, Liu W H, Li T F. Long-term watermelon continuous cropping leads to drastic shifts in soil bacterial and fungal community composition across gravel mulch fields. BMC Microbiology, 2022, 22(1): 1-12.
- [31] 刘巧玲, 李王成, 赵广兴, 贾振江, 安文举, 王洁, 穆敏. 覆砂和灌水量对退耕压砂地生态枣林土壤水热及枣果产量的影响. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 940-947.
- [32] 杨海江, 王建宇, 潘佳颖. 两种土壤类型压砂地硒含量的演变. 北方园艺, 2016, 40(20): 167-171.
- [33] 冯翠娥, 岳思君, 简阿妮, 陈丽萍, 郭洋, 郑蕊, 苏建宇. 晒砂瓜连作对土壤真菌群落结构的影响. 中国生态农业学报: 中英文, 2019, 27(4): 537-544.
- [34] 岳思君, 冯翠娥, 杨彦研, 陈丽萍, 郭洋, 郑蕊, 苏建宇. 不同连作年限晒砂瓜土壤细菌群落结构特征. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 230-236.
- [35] Liu Q L, Li Y Y, Li W C, Su Q K, Ma B, Mu M, Jia Z J, Zhao G X. Effect of the release of gravel elements on soil nutrients and jujube fruit yield under wet-and-dry cycles. Agronomy, 2022, 12(11): 2881.
- [36] 王洁, 李王成, 董亚萍, 赵广兴, 徐天渊. 宁夏中部干旱带压砂砾石矿质元素淋溶规律. 东北农业大学学报, 2021, 52(2): 60-69.
- [37] 代晓华, 胡景田, 杨金娟, 王占军, 何建龙, 蒋齐. 压砂地持续利用对土壤的影响. 西北农业学报, 2013, 22(10): 184-190.
- [38] 开建荣, 王晓静. 不同压砂地龄土壤肥力及晒砂瓜品质分析. 北方园艺, 2017, 41(3): 168-172.
- [39] 邱阳, 王亚军, 谢忠奎, 张亚娟. 砾石覆盖年限对连作农田土壤微生物和酶活性的影响. 水土保持通报, 2011, 31(5): 65-68, 181.
- [40] 邱阳, 王亚军, 谢忠奎, 张亚娟. 砾石覆盖对农田土壤有机碳、微生物和土壤酶活性的影响. 西北农业学报, 2011, 20(10): 176-180.
- [41] Qiu Y, Wang Y J, Xie Z K. Long-term gravel-sand mulch affects soil physicochemical properties, microbial biomass and enzyme activities in the semi-arid Loess Plateau of North-western China. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2014, 64(4): 294-303.
- [42] 贺婧, 王建宇, 王菲. 西瓜连作及倒茬对压砂地土壤酶活性的影响. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 294-296.
- [43] 王春燕, 李晓炜, 张雯莉, 王增如. 压砂西瓜连作土壤生物学特性和理化性质变化. 兰州大学学报: 自然科学版, 2021, 57(5): 659-664, 674.
- [44] Zhao C Z, Wang Y J, Qiu Y. Long-term effects of gravel-sand mulch thickness on soil microbes and enzyme activities in semi-arid Loess Plateau, Northwest China. Sciences in Cold and Arid Regions, 2021, 13(6): 510-521.
- [45] 王志强, 王兴祥, 刘声锋, 曲继松, 李孝刚, 郭松, 杨万邦, 董瑞, 田梅, 于蓉. 砂田西瓜连作障碍研究进展. 中国瓜菜, 2019, 32(7): 1-6.
- [46] 王占军, 蒋齐, 何建龙, 马琨. 宁夏环香山地区压砂地土壤微生物结构及功能多样性研究. 水土保持通报, 2013, 33(6): 290-294.
- [47] 李靖宇, 张肖冲, 田兴国, 张琇. 压砂地晒砂瓜自根苗/嫁接苗不同连作方式土壤微生物群落结构比较. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3608-3619.
- [48] 李凯. 连作与轮作对砂田西瓜土壤微生物学性状及化学性状的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
- [49] 逢蕾, 路建龙, 周茅先, 肖洪浪, 樊志龙, 柴守玺. 砂龄对砂田土壤微生物区系及理化性状的影响. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 185-192.
- [50] Romaní A M, Fischer H, Mille-Lindblom C, Tranvik L J. Interactions of bacteria and fungi on decomposing litter: differential extracellular enzyme activities. Ecology, 2006, 87(10): 2559-2569.
- [51] Manuel D B, Fry Ellen L, Eldridge David J, de Vries Franciska T, Peter M, Kelly H, Jens K, Gerhard B, Singh Brajesh K, Bardgett Richard D. Plant attributes explain the distribution of soil microbial communities in two contrasting regions of the globe. The New Phytologist, 2018, 219(2): 574-587.
- [52] 何苏琴, 文朝慧, 白滨, 张广荣, 孙述俊. 瓜拟多隔孢引起的砂田西瓜叶疫病. 植物病理学报, 2022, 52(3): 301-309.
- [53] Qu X H, Wang J G. Effect of amendments with different phenolic acids on soil microbial biomass, activity, and community diversity. Applied Soil Ecology, 2008, 39(2): 172-179.
- [54] 薛亮, 马忠明, 杜少平. 连作对砂田土壤质量及西瓜产量与品质的影响. 甘肃农业科技, 2011(6): 5-8.
- [55] 黄山松, 沈晖, 田军仓, 张晓. 自然条件下压砂年限对旱区压砂瓜生理特性及产量的影响. 北方园艺, 2017, 41(20): 122-128.
- [56] 马瑞, 王西娜, 田里, 余顺博, 魏照清, 杨宗凯, 谭军利. 施氮量对压砂西瓜生长、产量及品质的影响. 东北农业大学学报, 2022, 53(9): 58-66.
- [57] Callaway R M, Aschehoug E T. Invasive plants versus their new and old neighbors: a mechanism for exotic invasion. Science, 2000, 290(5491):

- 521-523.
- [58] Kato-Noguchi H, Le Thi H, Teruya T, Suenaga K. Two potent allelopathic substances in cucumber plants. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129(4): 894-897.
- [59] 郑阳霞, 唐海东, 李焕秀, 贺忠群, 秦耀国. 西瓜化感作用及其化感物质成分分析. *中国蔬菜*, 2011, 1(18): 58-63.
- [60] 马波, 田军仓. 宁夏中部压砂区表层土壤离子分布及盐分类型预测. *中国土壤与肥料*, 2021(5): 1-9.
- [61] Zou X Y, Li J F, Cheng H, Wang J P, Zhang C L, Kang L Q, Liu W, Zhang F. Spatial variation of topsoil features in soil wind erosion areas of northern China. *Catena*, 2018, 167: 429-439.
- [62] Coban O, De Deyn G B, van der Ploeg M. Soil microbiota as game-changers in restoration of degraded lands. *Science*, 2022, 375(6584): abe0725.
- [63] 耿文丛, 马悦, 张玉雪, 朱峰. 设施农业的土壤健康调控技术研究进展. *中国生态农业学报: 中英文*, 2022, 30(12): 1973-1984.
- [64] Zamioudis C, Pieterse C M J. Modulation of host immunity by beneficial microbes. *Molecular Plant-Microbe Interactions: MPMI*, 2012, 25(2): 139-150.
- [65] Hedden P, Sponsel V. A century of gibberellin research. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2015, 34(4): 740-760.
- [66] 岳思君, 李海荣, 武珍珍, 郑蕊, 周娟, 苏建宇. 硒砂瓜连作地微生物群落变化及一株优势芽孢杆菌的分离鉴定. *中国瓜菜*, 2016, 29(12): 19-22, 37.
- [67] 朱滕滕, 何学莲, 勉小娟, 马献, 郑蕊, 岳思君, 苏建宇. 硒砂瓜根际促生菌筛选鉴定及其促生效应研究. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(2): 221-229.
- [68] 李停锋, 李雯, 郭君钰, 顾欣. 土壤调理剂配施菌剂对连作压砂田土壤养分及西瓜生长、产量的影响. *核农学报*, 2021, 35(8): 1923-1930.
- [69] Xie W, Zhu A F, Ali T, Zhang Z T, Chen X G, Wu F, Huang J K, Davis K F. Crop switching can enhance environmental sustainability and farmer incomes in China. *Nature*, 2023, 616(7956): 300-305.
- [70] 张娟. 不同种植模式对砂田土壤微生物学性状及作物的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- [71] 吴宏亮, 康建宏, 陈阜, 许强, 张海林, 赵亚慧. 不同轮作模式对砂田土壤微生物区系及理化性状的影响. *中国生态农业学报: 中英文*, 2013, 21(6): 674-680.
- [72] 张笑. 嫁接苗与自根苗压砂瓜滴灌水肥一体化试验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [73] 黄山松. 栽培方式和灌溉定额对旱区压砂瓜生理性状、品质及产量的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [74] 刘晓雨. 宁夏香山地区不同品种、栽培方式压砂瓜滴灌制度试验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
- [75] 李志博. 香山地区不同品种、水质及栽培方式对压砂瓜光合、产量及品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [76] 杨荣华, 王燕. 压砂地西瓜新品种引进筛选试验. *现代农业科技*, 2019(1): 92-93.
- [77] 于蓉, 田梅, 董瑞, 王志强, 郭松, 郭守金, 刘声锋. 西瓜新品种‘宁农科3号’. *园艺学报*, 2013, 40(12): 2545-2546.
- [78] 赵相宇, 田军仓, 马波. 基于不同育苗方式对新引进西瓜品种需水规律和产量品质的研究. *南方农业学报*, 2021, 52(12): 3425-3433.
- [79] 孙蓟锋, 王旭. 土壤调理剂的研究和应用进展. *中国土壤与肥料*, 2013(1): 1-7.
- [80] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 不同有机肥对砂田西瓜产量、品质和养分吸收的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1269-1277.
- [81] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 有机无机肥配施对砂田西瓜产量、品质及水氮利用率的影响. *果树学报*, 2020, 37(3): 380-389.
- [82] 郭松, 刘声锋, 杜慧莹, 于蓉, 王志强, 田梅, 杨万邦. 生物菌复合基质对压砂地土壤墒情及西瓜产量的影响. *中国瓜菜*, 2021, 34(9): 62-65.
- [83] 刘云飞, 沈健, 苏壮壮, 宋希梅, 于蓉, 张显. 不同施肥组合对硒砂瓜产量和品质的影响. *中国瓜菜*, 2022, 35(11): 43-49.
- [84] 刘文辉. 生物炭对连作压砂地土壤质量及哈茨木霉拮抗性的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
- [85] 陈年来, 刘东顺, 王晓巍, 张建农, 任晓艳, 张玉鑫. 甘肃砂田的研究与发展. *中国瓜菜*, 2008, 21(2): 29-31.
- [86] 赵其国, 滕应, 黄国勤. 中国探索实行耕地轮作休耕制度试点问题的战略思考. *生态环境学报*, 2017, 26(1): 1-5.
- [87] 谢忠奎, 王亚军, 陈士辉, 张志山, 魏兴琥. 黄土高原西北部砂田西瓜集雨补灌效应研究. *生态学报*, 2003, 23(10): 2033-2039.
- [88] Xie Z K, Wang Y J, Wei X H, Zhang Z S. Impacts of a gravel-sand mulch and supplemental drip irrigation on watermelon (*Citrullus lanatus* [Thunb.] Mats. & Nakai) root distribution and yield. *Soil and Tillage Research*, 2006, 89(1): 35-44.
- [89] 安文举, 李王成, 赵广兴, 贾振江, 刘巧玲, 王洁, 穆敏, 李阳阳. 干湿循环对宁夏压砂砾石劣化的田间试验研究. *灌溉排水学报*, 2022, 41(6): 80-88.
- [90] 李王成, 赵研, 王帅, 田军仓, 王霞, 王双涛, 李晨, 王兴, 董亚萍. 宁夏压砂地砾石元素淋溶影响因素研究. *农业工程学报*, 2019, 35(19): 152-159.