

宁夏压砂地土壤肥力退化特征^①

周丽娜^{1,2}, 马英^{1,2}, 潘占东^{1,2}, 刘晓彤^{1,2}, 罗健航^{1,2}, 赵营^{1,2*}

(1 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2 农业农村部银川野外科学观测研究站, 银川 750002)

摘要: 为明确宁夏西瓜连作条件下压砂地土壤肥力的退化特征, 在宁夏硒砂瓜主产区中卫市选取原始荒地以及 1~5、5~10、10~20 和 >20 a 的压砂地耕层(0~20 cm)土壤为研究对象, 探究不同种植年限下压砂地土壤基本理化性质和酶活性的变化特征。结果表明: ①随种植年限增加, 土壤压实作用造成土壤结构变差, 土壤持水能力不断下降, 土壤盐分呈线性累积趋势($R^2=0.880\ 8$), 压砂地土壤有机质和养分含量均处于耗竭过程; ②随种植年限增加, 土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性呈显著降低趋势, 但土壤过氧化氢酶活性差异不明显; ③土壤酶活性与全钾含量呈显著负相关, 土壤 pH 和全盐含量是压砂地土壤理化性质和酶活性的主要影响因子。因此, 压砂地连作会导致土壤酶活性下降, 土壤肥力呈明显退化趋势。

关键词: 压砂地; 种植年限; 土壤理化性质; 土壤酶活性; 退化

中图分类号: S158; S651 **文献标志码:** A

Degradation Characteristics of Soil Fertility in Gravel-mulched Fields in Ningxia

ZHOU Lina^{1,2}, MA Ying^{1,2}, PAN Zhandong^{1,2}, LIU Xiaotong^{1,2}, LUO Jianhang^{1,2}, ZHAO Ying^{1,2*}

(1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2 Yinchuan Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan 750002, China)

Abstract: In order to clarify the degradation characteristics of soil fertility in gravel-mulched field under the condition of continuous cultivation of watermelon in Ningxia. In the main producing area of selenium-sand watermelon of Zhongwei City in Ningxia, 0–20 cm soil samples of the original wasteland, 1–5, 5–10, 10–20 and >20 years of gravel-mulched fields were sampled, and their basic physicochemical properties and key enzyme activities were analyzed and compared. The results showed that: 1) With the increase of cultivation years, soil structure was further deteriorated by soil compaction, and soil water holding capacity was decreased continuously, and soil salinity was in a linear accumulation ($R^2=0.880\ 8$), and soil organic matter and nutrient contents were in the process of depletion. 2) With the cultivation years increased, the activities of soil urease, alkaline phosphatase and sucrase were significantly decreased, but no significant difference occurred in soil catalase activity. 3) A negative correlation was found between soil enzyme activities and total potassium content. Soil pH and total salt were the main influencing factors on physicochemical properties and enzyme activities in gravel-mulched fields. Therefore, the continuous cultivation of gravel-mulched fields can lead to the decrease of soil key enzyme activities and the obvious degradation of soil fertility.

Key words: Gravel-mulched fields; Cultivation years; Soil physicochemical characteristics; Soil enzyme activity; Degradation

压砂地是我国西北地区一种典型的保护性耕作方式, 它是将 10 cm 左右厚的鹅卵石、砾石、粗砂和细砂的混合物或单体覆盖在土壤表层的耕作措施, 具有蓄水保墒、增温保温、减少蒸发、抗风蚀的作用^[1-3]。

宁夏中部干旱带由于年降水少且蒸发强烈, 水分是制约该区域农业发展的主要因子, 压砂种植有效解决了这一难题, 且以种植硒砂瓜为主。硒砂瓜具有较高的经济效益, 其栽培面积日益增加。宁夏压砂地主要分

①基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BBF02025)和宁夏回族自治区农业科技自主创新资金农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NKYGZL-2026-09)资助。

* 通信作者(tony029@126.com)

作者简介: 周丽娜(1980—), 女, 宁夏中宁人, 硕士, 副研究员, 主要从事土地退化及其生产力恢复研究。E-mail: linazhou1980@163.com

布在中卫市沙坡头区环香山地区、海原县关桥镇和中宁县鸣沙镇等地,以补水灌溉为主^[4-5]。由于长期的单一结构种植、风化作用及机械碾压等因素,紧密的砂石层产生分散趋势,砂石与土壤混合现象严重,造成砂质结构和土壤生态环境向劣势化发展^[2]。

连作是农田土壤质量退化的重要诱因,土壤肥力退化是农田土地生产力下降的显著特征。很多研究证实,随着连作年限的增加,植物的自毒作用、土壤理化性质的劣变、土壤中致病微生物的增殖和微生物区系失衡,导致连作障碍和土传病害日趋严重^[6-8]。硒砂瓜长期连续种植造成土壤板结、有机质含量降低、土壤养分失衡、土壤理化及生物性质恶化,导致土壤质量下降^[9-10]。有研究发现,连作会使土壤 pH 升高,土壤养分含量和酶活性下降,微生物群落退化,土传病害加剧,且随着连续种植年限的增加,这种不利趋势更加明显^[11]。从而引起西瓜枯萎病的发生,造成西瓜产量低、品质差^[12-14]。随着宁夏种植业结构的调整,压砂地有序退出成为地方产业发展的必然选择。探索宁夏不同种植年限压砂地土壤肥力的演变特征,识别其土壤肥力退化的关键因子,是退砂地土壤快速培肥亟待解决的关键问题。因此,本研究在宁夏中部干旱带的硒砂瓜主产区,以原始荒地作为对照,选择 1~5、5~10、10~20 和 >20 a 压砂地,采集砂石覆盖下 0~20 cm 土样,研究不同种植年限压砂地土壤理化性质和关键酶活性的变化特征,揭示压砂农田土壤肥力的演变规律与退化特征,为压砂地退砂后土壤定向培肥提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

调查研究区位于宁夏硒砂瓜主产区的中卫市沙坡头区香山乡、兴仁镇和海原县关桥乡,主要地形为山前带状洪积地形、山间洼地和盆滩地。研究区地处宁夏中西部,深居内陆,远离海洋,属典型的大陆性季风气候,俗称“宁夏中部风沙干旱区腹地”。特点是春暖迟、夏热短、秋凉早、冬寒长;干旱少雨、蒸发强烈、风大沙多、无霜期短,干旱、霜冻、风沙等自然灾害频繁。调查区压砂地土壤类型以灰钙土为主,还包括黄绵土和新积土,土壤质地多为砂壤土。

1.2 调查取样与分析方法

1.2.1 土壤样品采集 2022 年 4 月,选取调查区域原始荒地(CK)以及 1~5、5~10、10~20 和 >20 a 压砂地,铲除表面覆盖砂石(厚度为 10~20 cm),从土壤界面采集 20 cm 深度的土样。每个田块采用“五点法”

采集 1 个混合样,同时采集 3 个环刀土样备测土壤容重和田间持水量。

1.2.2 土壤理化性质测定 土壤容重和田间持水量均采用环刀法测定(分别参照 NY/T 1121.4—2006^[15]和 NY/T 1121.22—2010^[16])。土壤化学性质测定参照《土壤农化分析》^[17]: pH 采用土壤酸度计法测定(水土质量比 5:1);全盐含量采用电导仪测定;有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮、全磷、全钾采用 H₂O₂-H₂SO₄ 消解,分别采用凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效磷和速效钾分别采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗体比色法和乙酸铵浸提-火焰光度计法测定;

1.2.3 土壤酶活性测定 土壤酶活性参照关松荫^[18]的方法测定:脲酶活性采用靛酚蓝比色法,以每克土壤 1 min 内水解产生的氨态氮的毫克数表示(mg/(g·min));碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法,以每克土壤 1 min 内释出的苯酚的毫克数表示(mg/(g·min));蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,以每克土壤 1 min 内生成葡萄糖的毫克数表示(mg/(g·min));过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法,以 20 min 内每克土壤分解的 H₂O₂ 毫克数表示(mg/g)。

1.3 数据统计与分析

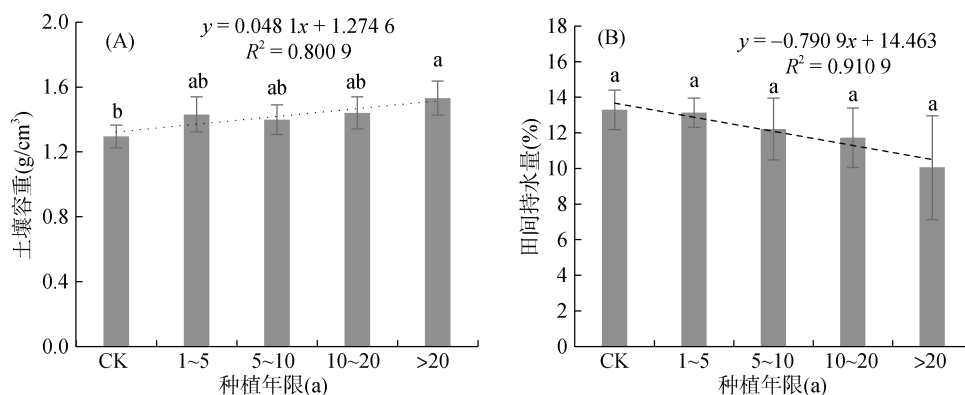
数据采用 Excel 2010 整理和统计;采用 SPSS 25.0 进行方差分析,多重比较采用 Duncan 新复极差法,显著性水平 $P < 0.05$;采用 Origin 2024 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 宁夏压砂地土壤物理性质退化特征

由图 1A 可知,不同种植年限压砂地 0~20 cm 土层土壤容重的变化范围为 1.30~1.53 g/cm³。1~5 a 新压砂地,由于铺砂过程的压实作用,造成土壤容重快速增加至 1.43 g/cm³;随着压砂年限增加,土壤容重总体呈线性增加趋势($R^2=0.800\ 9$),20 a 以上压砂地土壤容重较 CK 显著增加 18.2%。这说明,随着压砂地种植年限增加,由于机械无法进行翻耕,造成土壤压实明显,结构变差。

由图 1B 可知,不同种植年限压砂地 0~20 cm 土层土壤田间持水量为 10.1%~13.3%。随着压砂年限的增加,土壤田间持水量呈线性降低趋势($R^2=0.910\ 9$);1~5、5~10、10~20 和 >20 a 压砂地土壤田间持水量较 CK 分别降低 1.2%、8.2%、11.8% 和 24.4%,但不同种植年限间差异均不显著。这表明随着种植年限的增加,压砂地土壤持水能力不断下降。



(图中小写字母不同表示不同种植年限间差异显著($P < 0.05$), 下同)

图 1 不同种植年限压砂地 0~20 cm 土层土壤容重(A)和田间持水量(B)的变化趋势

Fig. 1 Changes of soil bulk density (A) and field capacity (B) in 0~20 cm layers in gravel-mulched fields with different cultivation years

2.2 宁夏压砂地土壤化学性质退化特征

图 2 为不同种植年限压砂地 0~20 cm 土层土壤化学性质变化趋势。其中, 土壤 pH 介于 8.69~8.75 (图 2A), 不同种植年限间无显著差异; 土壤全盐量的变化范围为 0.18~0.50 g/kg (图 2B), 随着种植年限增加, 盐分处于线性累积状态($R^2 = 0.8808$), 种植超过 10 a 后, 土壤盐分含量显著高于荒地, 但均未达到轻度盐化土壤标准。不同种植年限压砂地 0~20 cm 土层土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量分别为 6.61~11.98、0.36~0.65、0.30~0.42、17.1~18.3 g/kg (图 2C~2F)。压砂地种植 5~10 a 后, 土壤有机质、全氮和全磷含量呈降低趋势; 而全钾含量相对稳定, 并在种植年限为 10~20 a 时达到最高值 18.3 g/kg。

对于速效养分(图 2G~2I), 不同种植年限压砂地 0~20 cm 土层土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 21.0~60.9、5.2~16.1、111.4~194.4 mg/kg。其中, 碱解氮、有效磷含量随种植年限呈二次曲线变化趋势(R^2 分别为 0.3382、0.5196), 速效钾含量则呈负线性相关($R^2 = 0.9506$)。随种植年限的增加, 速效养分耗竭现象十分明显, 5~10、10~20 和 >20 a 压砂地土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量较 1~5 a 压砂地分别显著降低 50.4%~63.3%、45.4%~67.4% 和 1.4%~30.2%, 尤其是碱解氮和有效磷耗竭现象突出。

综上所述, 随着种植年限增加, 压砂地 0~20 cm 土层土壤有机质、全氮、全磷以及速效氮、磷、钾养分含量均处于耗竭过程, 尤其是土壤有机质的显著降低, 直接影响土壤供肥能力; 同时, 虽然土壤盐分处于累积过程, 但尚未达到轻度盐化程度。因此, 退砂地的土壤培肥应以提高有机质为核心, 同时提升土壤氮磷水平, 并快速提高速效氮、磷、钾含量。

2.3 宁夏压砂地土壤酶活性变化

由表 1 可知, 不同种植年限压砂地土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性分别为 0.64~2.64 mg/(g·min)、1.29~3.15 mg/(g·min)、0.24~1.57 mg/(g·min) 和 7.81~9.81 mg/g, 随着种植年限增加, 土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性呈显著降低趋势。5~10、10~20 和 >20 a 压砂地土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性分别较 1~5 a 降低了 17.7%~65.2%、26.4%~58.9%、62.4%~82.7%, 但不同种植年限压砂地土壤过氧化氢酶活性差异不显著。这表明, 参与土壤碳氮磷转化的土壤酶活性随着种植年限的增加而明显降低。这也解释了压砂地土壤有机碳和氮磷速效养分含量降低的原因。

2.4 宁夏压砂地土壤理化性质和酶活性的相关性

由图 3 相关性热图可以看出, 土壤 pH 与全氮、全磷、有机质、速效钾、脲酶、全钾、碱解氮、蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶呈负相关, 但没有达到显著水平; 土壤全盐与速效钾、脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶、有机质、全氮、全磷和有效磷呈负相关, 其中与速效钾和脲酶达显著水平; 土壤全钾与蔗糖酶和碱性磷酸酶呈显著负相关; 有机质与全氮、全磷、碱解氮呈显著正相关; 碱解氮与全氮、全磷、有效磷、蔗糖酶呈显著正相关。综上所述, pH 和全盐含量越高, 越不利于土壤养分转化; 全钾对土壤主要酶活性具有抑制作用; 土壤碳、氮、磷之间有较强的相关性, 且影响土壤酶活性。

3 讨论

长期压砂种植直接影响土壤物理结构和保水能力。本研究发现, 随着压砂地种植年限增加, 0~20 cm

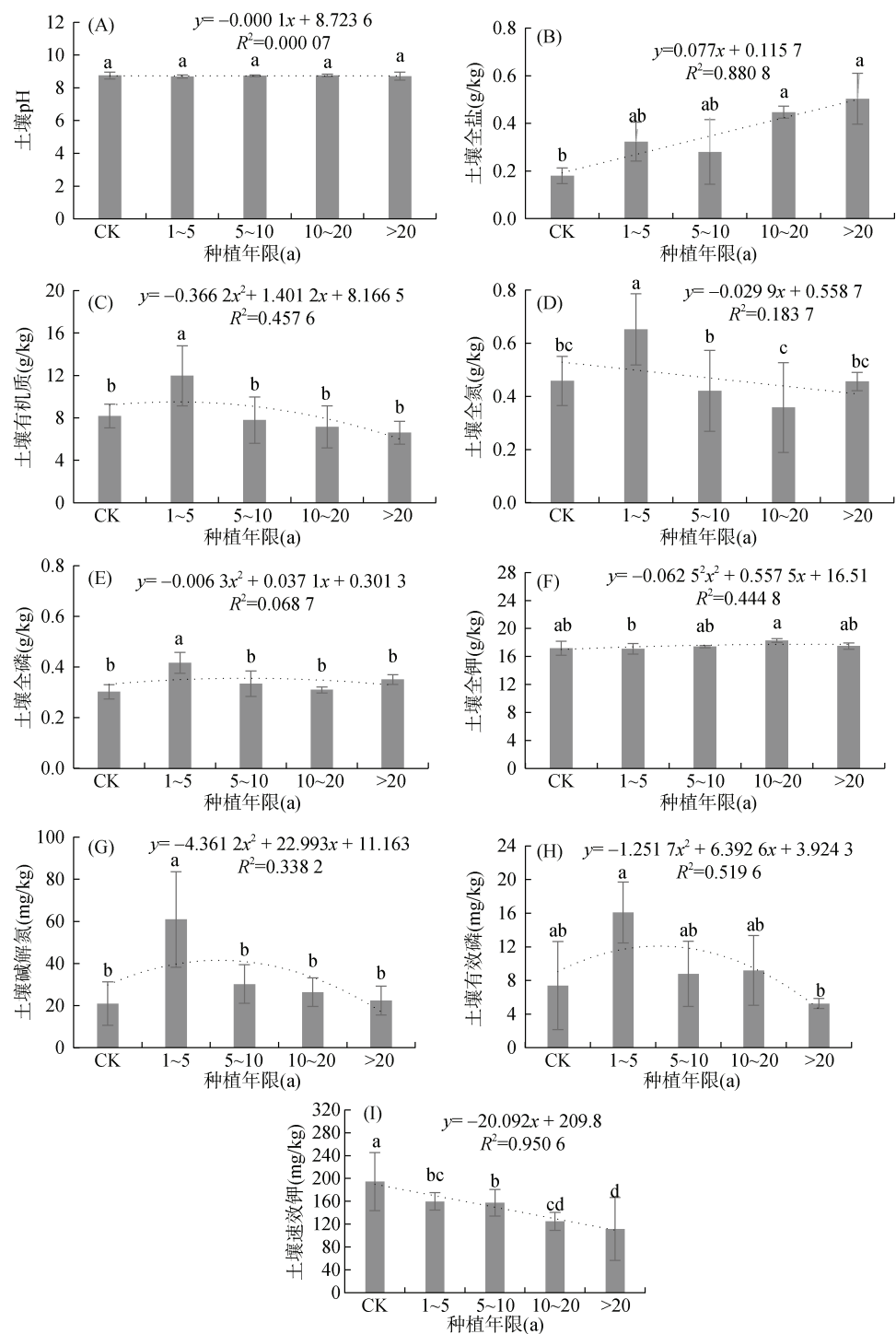


图 2 不同种植年限压砂地 0~20 cm 土壤化学性质变化趋势

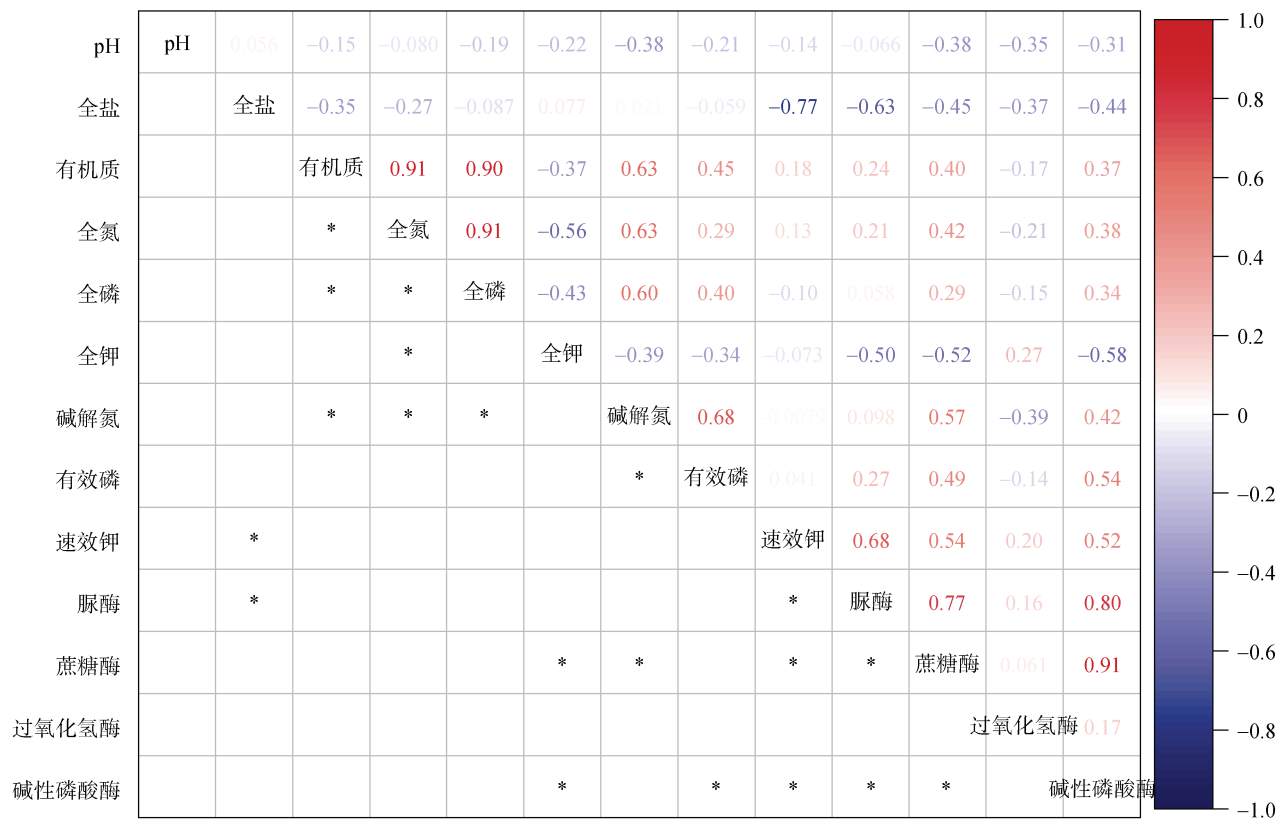
Fig. 2 Changes of soil chemical characteristics in 0-20 cm layers in gravel-mulched fields with different cultivation years

表 1 不同种植年限压砂地 0~20 cm 土层土壤酶活性

Table 1 Soil enzyme activities in 0-20 cm layers in gravel-mulched fields with different cultivation years

种植年限(a)	脲酶(mg/(g·min))	碱性磷酸酶(mg/(g·min))	蔗糖酶(mg/(g·min))	过氧化氢酶(mg/g)
CK	2.64±0.35a	2.93±0.31ab	1.38±0.30a	9.81±0.30a
1~5	1.84±0.89ab	3.15±0.78a	1.57±0.68a	7.81±0.33a
5~10	1.51±0.47bc	2.32±0.63abc	0.59±0.18b	8.89±0.16a
10~20	0.85±0.13bc	1.29±0.27c	0.24±0.08b	8.23±1.41a
>20	0.64±0.16c	1.79±0.35bc	0.44±0.10b	9.54±1.45a

注：表中数据为平均值±标准差(n=4)，同列数据小写字母不同表示不同种植年限间差异显著(P<0.05)。



(*表示相关性达 $P<0.05$ 显著水平)

图 3 宁夏压砂地 0~20 cm 土壤理化性质和酶活性的相关性

Fig. 3 Correlations between soil physicochemical properties and enzyme activities in 0~20 cm layer in gravel-mulched fields

土壤容重呈增加趋势，尤其 20 a 以上压砂地土壤容重较原始荒地显著提高了 18.2%；同时田间持水量呈不断降低趋势，20 a 以上压砂地较原始荒地降幅达 24.4%。研究表明，由于人为耙砂或犁耕的长期机械碾压作用，砂土混合导致土壤容重增加和孔隙度降低^[19]，土壤紧实度增加而通气透水性下降^[20]，压砂地土壤结构逐年变差^[21]，蓄水保墒能力逐年减退，土壤生产力逐年下降，严重影响压砂地可持续发展^[22]。胡景田等^[23]研究表明，随着压砂年限延长，土壤容重呈先降后升趋势，田间持水量呈先升后降趋势，整体蓄水保墒能力下降。也有研究^[24]认为，随压砂年限增加，土壤容重呈先升后降趋势，土壤毛管持水量、饱和导水率均呈下降趋势。但普遍认为，随着压砂年限的增加，压砂层的土砂混合使砂层堵塞、土壤板结，土壤保墒和水分入渗能力均明显降低^[25]，本研究也证实了这一结论。

大多数农田由于长期连续单一种植或常年相对统一的水肥管理措施，会导致土壤有机质损耗、土壤养分失衡、肥力下降等^[26-27]，抑制作物的生长，最终使作物产量和品质严重降低。本研究证实，压砂地连作 5 a 以后，0~20 cm 土壤有机质、全氮、全磷含量

随种植年限的增加呈明显降低趋势，速效氮、磷、钾养分也在不断耗竭，同时土壤盐分处于累积状态。这可能是由于压砂地的作物残体难以进入土壤，外源有机物料和肥料补充不足，加之砂田增温保墒性能下降所致^[3]。有研究^[28]认为，作物连作会导致土壤氮、磷、钾等主要养分的供给能力下降，本研究结果与此一致。王春燕等^[9]对连续种植 10 a 的压砂地西瓜土壤的研究发现，随着种植年限的增加，土壤 pH 和养分含量均逐渐下降。姚丽娟等^[29]研究表明，连续种植 10 a 的西瓜土壤 pH、铵态氮和速效钾极显著低于对照，而硝态氮和有效磷极显著高于对照。文方芳等^[30]研究表明，土壤磷钾富集、酸化和次生盐渍化是北京西瓜主产区连作障碍的主要诱因。而本研究发现，不同种植年限压砂地土壤 pH 变化不明显，且盐分累积未达到次生盐渍化程度。

土壤酶直接参与土壤物质转化及能量传递，是衡量土壤肥力的重要指标，连作对土壤酶活性具有很大影响^[3]。本研究中，随着压砂地种植年限的增加，土壤脲酶和蔗糖酶活性显著降低，碱性磷酸酶活性先升高后降低，过氧化氢酶活性则无显著性变化。颜顾浙等^[31]研究发现，不同植物 3 季连作后土壤酶活性多

数呈增加趋势; 胡景田等^[23]研究认为, 压砂地连续种植 8~15 a, 土壤酶活性开始出现低于裸地的情况。不同土壤酶活性降低的时间节点存在明显差异^[32]。土壤酶活性随时间变化并非简单的线性关系, 20~30 cm 土层土壤脲酶、过氧化氢酶活性出现突变点, 总体随种植年限先升高后降低, 压砂地酶活性骤降多在 3~5 a, 连续种植 5~7 a 表现出明显连作障碍^[19]。因此, 由于土壤酶活性受种植作物种类、土壤类型及连作年限等多因素耦合影响, 土壤酶活性与连作年限间关系的定量描述难以实现^[3]。

土壤酶活性变化受有机质含量影响, 土壤养分含量对土壤酶活性的影响也不可忽视。本研究发现, 压砂地 0~20 cm 土壤 pH 与全盐含量是影响土壤理化性质和土壤酶活性的主要因子; 土壤脲酶活性与速效钾含量, 蔗糖酶活性与碱解氮、速效钾含量, 碱性磷酸酶活性与有效磷、速效钾含量之间呈显著正相关; 土壤脲酶活性与全盐含量, 蔗糖酶活性与全钾含量, 碱性磷酸酶活性与全钾含量呈显著负相关。有研究证实, 土壤有机质含量和全盐含量是影响西北瓜田土壤生物多样性的主要因子, 长年连续种植会提高土壤总盐含量^[33]。李蕾等^[34]研究表明, 连作条件下过氧化氢酶活性与全磷、全钾、有效磷、速效钾含量和 pH 呈显著负相关, 蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶活性与全磷、全钾、有效磷、速效钾和 pH 呈显著正相关。有关压砂地土壤有机质、酶活性与微生物三者间的相互关系及影响机制, 以及退砂地轮作休耕模式、耕层构建和土壤快速培肥的研究仍需加强。

4 结论

1) 随着压砂地种植年限增加, 土壤容重呈线性增加趋势, 而土壤田间持水量呈线性降低趋势, 土壤压实作用造成土壤结构变差, 土壤持水能力不断下降。

2) 随着种植年限增加, 压砂地 0~20 cm 土壤有机质、全氮、全磷、速效氮磷钾养分含量均处于耗竭过程, 土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性呈显著降低趋势。

3) 压砂地土壤脲酶活性与速效钾含量, 蔗糖酶活性与碱解氮、速效钾含量, 碱性磷酸酶活性与有效磷、速效钾含量呈显著正相关; 脲酶活性与全盐含量, 蔗糖酶活性与全钾含量, 碱性磷酸酶活性与全钾含量呈显著负相关。

4) 压砂地连作会导致土壤酶活性下降, 并使土壤相关理化性质变差; pH 与全盐含量是土壤理化性

质及酶活性的主控因素, 土壤酶活性与全钾含量密切相关。

参考文献:

- [1] 张娟, 吴宏亮, 康建宏, 等. 不同种植模式对新压砂瓜田土壤养分和土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 107-113.
- [2] 王建宇, 王超, 王菲, 等. 基于田间尺度的压砂地土壤肥力评价[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 36-41.
- [3] 李王成, 黄亚浩, 马东祥, 等. 砂田退化机制及其修复改良措施: 研究进展及展望[J]. 江西农业大学学报, 2025, 47(2): 277-290.
- [4] Shen T T, Zhang X, Li L, et al. Dynamic changes in rhizosphere microbial communities of watermelon during continuous monocropping with gravel mulch[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24(1): 775-790.
- [5] 王海燕, 高祥照. 宁夏中部干旱带旱作节水农业发展思路的探索[J]. 中国农业信息, 2010, 22(6): 22-24.
- [6] 游川, 杨天杰, 周新刚, 等. 连作根系分泌物加剧土传病害的机制和缓解措施研究进展[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1201-1211.
- [7] 苏浩, 张锐澎, 吴思炫, 等. 连作障碍产生机理及防控现状[J]. 土壤, 2024, 56(2): 242-254.
- [8] 敖金成, 秦树刚, 邱学礼, 等. 烟草根腐病不同抗性品种根际土壤真菌群落结构及功能对连作的响应[J]. 土壤, 2025, 57(1): 107-113.
- [9] 王春燕, 李晓炜, 张雯莉, 等. 压砂西瓜连作土壤生物学特性和理化性质变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(5): 659-664, 674.
- [10] 赵营, 刘晓彤, 罗健航, 等. 压砂地土壤质量演变特征及其退砂后土壤培肥建议[J]. 宁夏农林科技, 2023, 64(11): 40-42, 69.
- [11] Zhang P P, Xia L H, Sun Y T, et al. Soil nutrients and enzyme activities based on millet continuous cropping obstacles[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 17329.
- [12] Ling N, Deng K Y, Song Y, et al. Variation of rhizosphere bacterial community in watermelon continuous mono-cropping soil by long-term application of a novel bioorganic fertilizer[J]. Microbiological Research, 2014, 169(7/8): 570-578.
- [13] 李停锋, 李雯, 郭君钰, 等. 生物有机肥对连作压砂田土壤肥力及西瓜品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(5): 109-116.
- [14] Wu X, Wu C N, Lu D P, et al. Variation of soil microbial community and sterilization to *Fusarium oxysporum* f.sp. *niveum* play roles in slightly acidic electrolyzed water-alleviated watermelon continuous cropping obstacle[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 837121.
- [15] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第4部分: 土壤容重的测定: NY/T 1121.4—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第22部分: 土壤田间持水量的测定—环刀法: NY/T 1121.22—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [19] 王菲, 王建宇, 贺婧, 等. 压砂瓜连作对土壤酶活性及理化性质影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 108–114.
- [20] 王超, 王菲, 吴秀玲, 等. 压砂年限对土壤质量的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 190–195.
- [21] Shen H M, Zhu Z H, Chen Y Y, et al. Influence of gravel coverage on hydraulic characteristics and sediment transport capacity of runoff on steep slopes[J]. Water, 2025, 17(3): 361.
- [22] 谭军利, 马永鑫, 王西娜, 等. 微咸水灌溉下滴头流量及灌水量对压砂土壤入渗及水盐分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 113–120.
- [23] 胡景田, 马琨, 王占军, 等. 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[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 53–58.
- [24] 刘晓慧. 宁夏压砂地生态修复对策及建议[J]. 宁夏农林科技, 2023, 64(1): 60–64, 67.
- [25] 王幼奇, 阮晓晗, 白一茹, 等. 不同种植年限压砂地土壤水分入渗过程及模型分析[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(10): 1048–1055.
- [26] 洪华阳, 魏天齐, 周红梅, 等. 修复连作大蒜土壤生产力衰退的有机质补偿方案与初步机理[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1386–1397.
- [27] Zhang H Q, Zheng X Q, Wang X T, et al. Effect of fertilization regimes on continuous cropping growth constraints in watermelon is associated with abundance of key ecological clusters in the rhizosphere[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 339: 108135.
- [28] 李珣, 余柏均, 喻佳欣, 等. 植物连作对土壤生态系统的影响[J]. 四川农业科技, 2024(9): 48–50.
- [29] 姚丽娟, 田春丽, 王立河, 等. 设施西瓜连作土壤生化性质及微生物群落变化[J]. 中国土壤与肥料, 2024(3): 70–78.
- [30] 文方芳, 于兆国. 北京西瓜主产区养分管理与连作障碍因子分析[J]. 中国土壤与肥料, 2024(6): 142–148.
- [31] 颜顾浙, 方伟, 卢络天, 等. 土壤酶活性对不同植物连作的差异响应[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(3): 520–530.
- [32] 王超. 连作砂田土壤质量演变研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [33] 阿衣加玛丽·库都热提, 刘煜祥, 潘卫萍, 等. 甜瓜连作种植降低中小型土壤动物多样性及土壤生态系统多功能性[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(6): 44–54.
- [34] 李蕾, 付敬锋, 魏盛, 等. 不同连作年限对薏苡土壤特性、产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(6): 87–96.

(责任编辑: 毛小芳)