

DOI: 10.20103/j.stxb.202401170147

贾振江, 吴洋洋, 李王成, 姚晓翠, 马东祥, 陈继虹. 中国西北旱区砂田表层土壤养分效应对连作响应的整合分析. 生态学报, 2024, 44(15): 6597-6608.

Jia Z J, Wu Y Y, Li W C, Yao X C, Ma D X, Chen J H. Meta-analysis of effects of continuous cropping on topsoil nutrients in gravel-sand mulched field in arid regions of Northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6597-6608.

中国西北旱区砂田表层土壤养分效应对连作响应的整合分析

贾振江¹, 吴洋洋¹, 李王成^{1,2,3,4,*}, 姚晓翠⁵, 马东祥¹, 陈继虹¹

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 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室, 银川 750021

5 南京林业大学生命科学学院, 南京 210037

摘要: 为明确砂田表层土壤养分对连作的响应规律, 深入揭示砂田性能逐年退化机理, 文章基于国内外已发表的 16 篇相关文献的 586 组有效数据, 借助 Meta-analysis 方法进行整合定量研究, 定量分析覆砂 1—3 年农田与其他连作年限砂田(4—6 年、7—9 年、10—12 年、13—15 年、16—20 年)在表层土壤水分状况(SWC)、养分特性(有机质 SOM、全氮 TN、全磷 TP、全钾 TK、碱解氮 AN、速效磷 AP、速效钾 AK、全盐 TSS)和酸碱环境(pH)方面的差异效应, 系统阐释砂田表层土壤养分特性逐年变异的发生路径及驱动因素, 进而综合评估其肥力水平。结果表明: 伴随种植年限的增加, 砂田表层土壤水分储量和养分强度整体呈现下降态势($P < 0.05$), 4—20 年的土壤 SWC、SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK 含量分别较 1—3 年减少 39.06%、14.21%、14.96%、10.06%、8.20%、15.87%、37.01%、18.60% ($P < 0.05$)。表层土壤 SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK 主要于 10—12 年开始大幅流失($P < 0.05$), 而 4—6 年土壤 SOM、TP、TK、AK 含量的相对变化则不显著($P > 0.05$)。砂田在耕作 12 年内具有显著压盐效果, 12 年以后的表层土壤 TSS 含量则开始呈现逐年增加的发展趋向($P < 0.05$), 其土壤 pH 整体增加 1.29% ($P < 0.05$)。连作年限是砂田表层土壤 TN、TP 和 AK 变异的关键因子; SWC 则为土壤 SOM、AP 和 TSS 演化的主导要素。总体而言, 砂田在连作 10 年左右即可出现明显的养分亏缺状态。因此, 亟需提出科学合理的农田管理措施, 以有效提升退化砂田的土壤肥力水平。

关键词: 砂田; 连作; 表层土壤; 养分退化; 中国西北旱区; 整合分析

Meta-analysis of effects of continuous cropping on topsoil nutrients in gravel-sand mulched field in arid regions of Northwest China

JIA Zhenjiang¹, WU Yangyang¹, LI Wangcheng^{1,2,3,4,*}, YAO Xiaocui⁵, MA Dongxiang¹, CHEN Jihong¹

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 Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River in Ningxia, Yinchuan 750021, China

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

Abstract: The prolonged tillage, unreasonable irrigation and wind erosion bring crisis and uncertainty to the soil quality and

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); 清华大学-宁夏银川水联网数字治水联合研究院项目(sklhse-2023-low013); 宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2021A03)

收稿日期: 2024-01-17; 网络出版日期: 2024-05-24

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

land productivity of gravel-sand mulched field in the arid and semi-arid areas of Northwest China. However, the comprehensive impact of continuous cropping on topsoil nutrients in gravel-sand mulched field is currently unclear. In this study, we collected 586 pieces of data from 16 papers published in international and domestic journals. After that, the differences in soil water content (SWC), soil nutrient properties (SOM, TN, TP, TK, AN, AP, AK, TSS, representing soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkaline nitrogen, available phosphorus, available potassium and total soluble salt, respectively), and soil pH between gravel-sand mulched field with different continuous cropping years (4—6, 7—9, 10—12, 13—15, and 16—20) and farmland mulched with gravel for 1—3 years (CK) were quantitatively analyzed based on Meta-analysis. Furthermore, the response characteristics, occurrence path and driving factors of topsoil nutrient properties to continuous cropping years and water-salt environment were systematically clarified, and the soil fertility level of all treatments was comprehensively evaluated using principal component analysis, aiming to further deeply reveal the soil nutrient degradation mechanism of continuous cropping gravel-sand mulched field. The results showed that the topsoil moisture and nutrients of gravel-sand mulched field presented an overall downward trend with increasing years of continuous cropping ($P < 0.05$). Compared to CK, the contents of SWC, SOM, TN, TP, TK, AN, AP, and AK of 4—20 years decreased by 39.06%, 14.21%, 14.96%, 10.06%, 8.20%, 15.87%, 37.01%, and 18.60%, respectively ($P < 0.05$). It was worth noting that the contents of SOM, TN, TP, TK, AN, AP, AK began to significantly decline from 10 to 12 years ($P < 0.05$). However, the relative changes in soil SOM, TP, TK, and AK contents of 4—6 years were not significant ($P > 0.05$). Gravel-sand mulched field had a significant salt pressure effect within 12 years of cultivation ($P < 0.05$). After that, the topsoil TSS content began to show an increasing trend ($P < 0.05$), and soil pH increased by 1.29% overall ($P < 0.05$). The continuous cropping years were key factor for the variation of TN, TP and AK, and SWC was the dominant factor in the succession of SOM, AP and TSS in gravel-sand mulched field. In conclusion, gravel-sand mulched field would experience significant topsoil nutrient deficiencies after about 10 years of continuous cropping. Therefore, it is urgent to propose scientific and reasonable farmland management measures to effectively improve the soil fertility of degraded gravel-sand mulched field.

Key Words: gravel-sand mulched field; continuous cropping; topsoil; nutrient degradation; arid regions of Northwest China; Meta-analysis

在干旱半干旱地区,砾石覆盖因其在改善土壤生态环境,提升农业生产效能等方面的优良特性而备受推崇^[1-3]。然而,砂田土壤质量在长期人类活动和气候变化下易发生不同程度退化,致使大量老化砂田被撂荒,并使其不断朝着盐碱化、荒漠化、石漠化以及水土流失的方向演替^[4-5]。以砾石覆盖的核心种植区—宁夏环香山地带为例,预计至 2037 年左右^[6],该地区的退化砂田面积将超过 $1.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$,砂田的可持续性正面临农业经济发展和生态环境安全的双重挑战与危机^[7]。

土壤健康作为农业绿色发展的基石,深刻影响农业生产的结构、布局和效益^[8]。诸多研究表明^[9-10],连作是砂田土壤质量逐年恶化的关键诱因。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、风蚀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^[8,11]。进一步的研究结果显示^[12-14],连作对砂田的增温保墒、压碱抑盐等特性具有显著负面效应,并伴随潜在养分消耗殆尽、微生态环境恶化、作物病虫害频发等困境的形成。因此,砂田通常在连作 7—10 年即可发生明显连作障碍^[7]。然而,受制于砂田自身覆盖类型、耕作性质、种植结构和田间管理方式等因素^[9],表层土壤养分及其酸碱环境对长期连作的响应过程存在显著差异效应^[7]。部分资料显示^[13,15-16],连作对砂田土壤养分出现单一抑制效应或部分无显著影响。同时,由于砂田的逆向演替^[17]、降雨或灌溉淋洗^[18]和作物生理代谢影响^[19],连作下的表层土壤水盐运移亦表现出相对复杂的变化,其与连作年限间尚缺乏明确的定量关系。综上,尽管砂田土壤演变特征受控于种植年限的事实已有成论,但目前仍

难以确定的是,砂田表层土壤养分效应(水分含量、养分特性、酸碱环境)对长期自然风化和人为干扰的演进历程究竟如何,致使其发生变异的关键驱动因素如何体现?同时,值得进一步深思的是,砂田表层土壤养分对连作的综合响应过程及其亏缺阈值年限如何确定?因此,开展相关研究的大量数据收集、整合、量化与验证工作尤为必要。

相较于传统综述,Meta-analysis(Meta)分析在解决不同研究结果效应尺度方面更具系统性、客观性和科学性,对于指导与解决复杂的农业生产问题具有重要现实意义^[20]。目前,关于连作下砂田土壤各要素的研究往往相互独立且响应结果存在迥异。同时,尚缺乏对连作砂田土壤肥力水平的系统评价,致使学者们对其土壤环境退化的形成原因、内在机理和发展态势的深度认识受到极大限制^[7]。鉴于此,本文以我国西北旱区连作砂田为研究对象,基于已有研究成果的统计整合分析,旨在定量描述砂田表层土壤水分含量、养分特性以及酸碱环境对连作的响应特征,筛选解析致使砂田表层土壤养分特性发生变异的关键诱因,综合评价退化砂田的土壤肥力演变进程,进而深入揭示砂田连作障碍发生的可能机理,以期旱区退化砂田的生态修复与土地综合治理提供科学、精准、有效的数据基础和实践依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究通过在 Web of Science(WoS)核心数据库(<http://www.webofknowledge.com>)和中国知网(CNKI)数据库(<https://www.cnki.net>)中进行文献检索,旨在收集 2023 年 11 月 1 日前已公开发表在国内外期刊上的关于中国西北旱区连作砂田表层土壤养分演变的田间试验文献。文献检索过程中,设置中文检索词为“砂田连作”、“砾砂瓜连作”、“砂田退化”、“砾石覆盖年限”、“覆砂年限”或“压砂年限”;英文检索词则主要包括“gravel mulch OR gravel-sand mulch”AND “long-term continuous cropping OR long-term effect OR soil degradation”。检索完成后,对收集的文献按照以下标准进行进一步筛选:(1)试验地点位于中国西北旱区(陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区);(2)试验内容为连作砂田的田间取样或野外调查,且包含详细的连作年限描述以及对照组(CK:连作 1—3 年的砂田)和处理组(T:连作 4—20 年的砂田)设置;(3)试验内容至少包含砂田表层土壤(多数为 0—20 cm,少量为 0—15 cm、5—20 cm 和 0—30 cm)水分含量(SWC, m/m)、养分特性(有机质 SOM、全氮 TN、全磷 TP、全钾 TK、碱解氮 AN、速效磷 AP、速效钾 AK、全盐 TSS)和酸碱环境(pH)中的一项,并以文字、数字、图表形式表述或呈现;(4)重复发表的文献只纳入最早公开的试验数据。经过逐篇筛选,最终获得符合条件的中英文文献 16 篇,共计 586 组数据,构成本研究的样本数据库(图 1)。其中,样本所涉研究区域均位于宁夏回族自治区中卫市环香山地带(包括香山乡、海原县等)。

1.2 数据分析

于文献中提取的数据信息主要包括平均值(X)、样本量(n)和标准差(SD)。若文献中仅给出标准误差(SE),则按式(1)进行转化计算;若均未给出 SD 与 SE 数值,则默认选择 X 的 $1/10$ ^[21]。

$$SD = SE\sqrt{n} \quad (1)$$

本研究采用效应值($\ln R$,效应比 R 的自然对数)用以评估连作对砂田表层土壤养分效应的影响效应^[22],其计算公式见式(2):

$$\ln R = \ln(X_t/X_c) = \ln X_t - \ln X_c \quad (2)$$

式中, $\ln R$ 为无量纲参数,若 $\ln R > 0$,表示连作对提高砂田表层土壤养分效应具有正向效应,反之则为负向效应; X_t 为处理组土壤数据中某一指标的平均值; X_c 则为对照组中对应指标的平均值。

V 为单个样本效应值所对应的方差,其计算公式见式(3):

$$V = \frac{SD_t^2}{n_t SD_t^2} + \frac{SD_c^2}{n_c SD_c^2} \quad (3)$$

式中, SD_t 、 n_t 分别为处理组土壤数据中某一指标的标准差和样本量; SD_c 、 n_c 则为对照组中对应指标的标准差

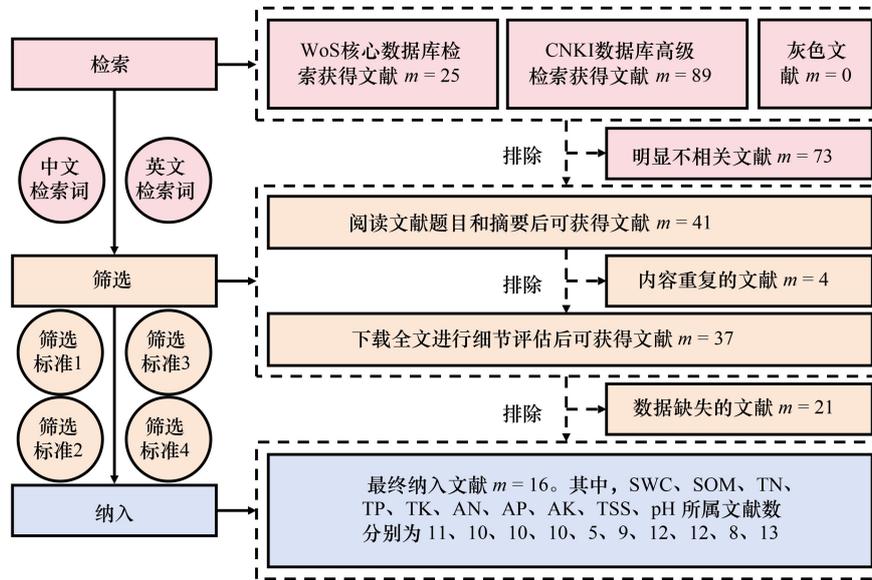


图1 文献筛选流程

Fig.1 Literature screening process diagram

m :文献数量 Number of papers;SWC:土壤水分含量 Soil water content;SOM:土壤有机质 Soil organic matter;TN:土壤全氮 Soil total nitrogen; TP:土壤全磷 Soil total phosphorus;TK:土壤全钾 Soil total potassium;AN:土壤碱解氮 Soil alkaline nitrogen;AP:土壤速效磷 Soil available phosphorus;AK:土壤速效钾 Soil available potassium;TSS:土壤全盐(土壤可溶性盐) Soil total soluble salt

与样本量。

采用综合效应值($\ln R_{++}$)以进一步明确砂田表层土壤水分含量、养分特性和酸碱环境对连作年限(整体和亚组)的总体响应特征,其计算公式见式(4):

$$\ln R_{++} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \ln R_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (4)$$

式中, ω_i 表示土壤数据中某一指标下第*i*个样本效应值的权重,即为对应样本方差 V_i 的倒数;其他参数同上式。

为直观描述连作对砂田表层土壤养分效应的影响,借助相对变化率(RC)用以表示不同处理组的相关指标较对照组的变化率,其计算公式见式(5):

$$RC = (R_{++} - 1) \times 100\% \quad (5)$$

若 RC 的95%置信区间(95% CI)包含0,认为处理组与对照组间的差异不显著($P_Q > 0.05$);反之,则认为二者间具有显著差异($P_Q < 0.05$)。

进一步地,通过卡方检验(Chi-square test)进行有效土壤数据的异质性分析,若检验结果显著($I^2 > 50\%$ 或 $P_Q < 0.05$),则选择随机效应模型(Random effect model, REM);反之,则选择固定效应模型(Fixed effect model, FEM)。同时,基于失安全系数法(Rosenthal's fail-safe method)进行文献发表偏倚检验^[23],若 $N > 5n + 10$,则表示研究不存在发表偏倚(其中, N 为失安全系数, n 为样本量)。

由表1可知,连作砂田表层土壤养分效应中8项指标(SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK、TSS)的异质性检验结果均显著($I^2 > 50\%$ 或 $P_Q < 0.05$),同时,各研究均不存在发表偏倚。因此,本研究选用REM模型对其进行数据合成和分析。进一步地,进行基于不同连作年限(4—6年、7—9年、10—12年、13—15年、16—20年)的亚组分析。分组时,为避免结果的偶然性和片面性,每个亚组至少摘录3篇文献。

特别值得注意的是,连作砂田表层土壤养分效应中的 2 项指标(SWC、pH)均不存在显著异质性($I^2 < 50\%$ 且 $P_Q > 0.05$)。因此,应选用 FEM 模型对其进行数据合成和分析,且不必进行基于不同连作年限的亚组分析。

表 1 连作砂田表层土壤养分效应有效数据的异质性和发表偏倚检验

指标 Index	<i>n</i>	模型类型 Model type	异质性检验 Heterogeneity test			<i>N</i>
			<i>Q</i>	<i>P_Q</i>	<i>I²/%</i>	
SWC	66	FEM	1898587.01	0.000 **	100.00	16874841.8
SOM	65	REM	160.90	0.000 **	60.22	419.6
TN	67	REM	195.77	0.000 **	66.29	889.6
TP	53	REM	89.42	0.001 **	41.85	648.4
TK	34	REM	292.77	0.000 **	88.73	1509.0
AN	51	REM	179.86	0.000 **	72.20	1612.2
AP	71	REM	1346.56	0.000 **	94.80	22097.0
AK	71	REM	163.22	0.000 **	57.11	3198.0
TSS	51	REM	77.23	0.008 **	35.26	1307.0
pH	57	FEM	5809.08	0.000 **	99.04	3479.7

n: 样本量 Number of samples; SWC: 土壤水分含量 Soil water content; SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; TP: 土壤全磷 Soil total phosphorus; TK: 土壤全钾 Soil total potassium; AN: 土壤碱解氮 Soil alkaline nitrogen; AP: 土壤速效磷 Soil available phosphorus; AK: 土壤速效钾 Soil available potassium; TSS: 土壤全盐(土壤可溶性盐) Soil total soluble salt; REM: 随机效应模型 Random effect model; FEM: 固定效应模型 Fixed effect model; *Q*: 异质性统计量 Heterogeneity statistics; *P_Q*: *Q* 的显著性值 The significance value of heterogeneity statistics; *I²*: 异质性占比 Heterogeneity proportion; *N*: 失安全系数 Fail-safe number; * 表示检验结果达显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示检验结果达极显著水平 ($P < 0.01$)

1.3 数据处理

借助 GetData Graph Digitizer 2.20 进行数据提取; Microsoft Excel 2016 进行数据整理; MetaWin 2.1 进行数据整合分析; SPSS 24.0 软件进行连作砂田表层土壤养分特性与连作年限、水分状况、酸碱环境的逐步回归分析(Stepwise regression analysis, $P < 0.05$)和通径分析(Path analysis, $P < 0.05$); Origin 2018 C 进行制图,并对具体连作年限和不同亚组的砂田表层土壤养分特性指标进行主成分分析(Principal component analysis)。

2 结果与分析

2.1 砂田表层土壤养分效应对连作的响应过程

砂田表层土壤养分效应随连作的长期动态演替(1—20 年)见图 2。土壤 SWC、SOM、TN、TP、AN、AP、AK 含量均随连作年限的增加而显著线性下降($P < 0.05$),其年际平均变化速率分别为 $-0.283 \text{ g g}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.178 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.011 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.009 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.797 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.498 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 、 $-3.981 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。然而,与上述结果迥异的是,砂田表层土壤的 TSS 含量与连作时长则为二次多项式关系($P < 0.05$)。进一步的结果显示,地表覆砂在连作 12 年内具有压盐功效,12 年之后则开始呈现负向发展趋向。由此可见,长期的耕作侵蚀可能诱发土壤次生盐渍化。此外,值得注意的是,尽管土壤 TK 含量及 pH 值对连作年限整体呈现下降($-0.077 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$)和增加($0.006/\text{a}$)的响应态势,但二者均未出现显著效应($P > 0.05$)。

2.2 连作对砂田表层土壤养分效应的影响效应

整体来看,连作对砂田表层土壤的 SWC、SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK、TSS 均具显著抑制作用(图 3, $P < 0.05$),其含量分别较 CK(1—3 年)缩减 39.06% (95% CI: $-39.09\% \text{—} -39.02\%$)、14.21% (95% CI: $-19.72\% \text{—} -8.32\%$)、14.96% (95% CI: $-16.89\% \text{—} -12.99\%$)、10.06% (95% CI: $-14.06\% \text{—} -5.87\%$)、8.20% (95% CI: $-9.22\% \text{—} -7.19\%$)、15.87% (95% CI: $-18.39\% \text{—} -13.28\%$)、37.01% (95% CI: $-38.62\% \text{—} -35.36\%$)、18.60% (95% CI: $-20.82\% \text{—} -16.32\%$)、42.53% (95% CI: $-49.52\% \text{—} -34.56\%$)。然而,连作对提升 4—20 年的砂田土壤 pH 则具有显著的正向效应($P < 0.05$),其增幅可达 1.29% (95% CI: $1.22\% \text{—} 1.35\%$)。

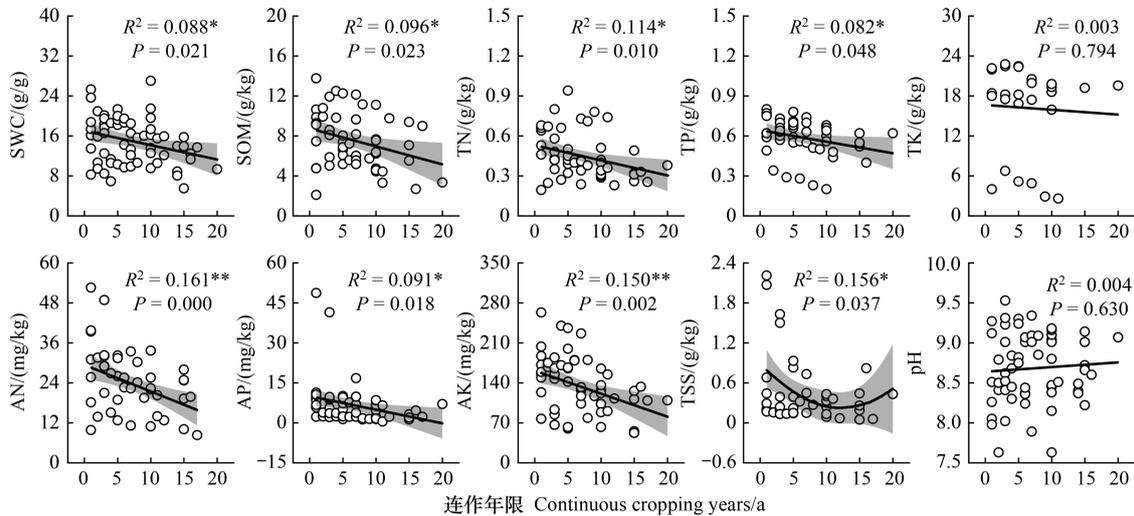


图2 砂田表层土壤养分效应与连作年限的相关关系

Fig.2 The correlation between topsoil nutrients and continuous cropping years in gravel-sand mulched field

阴影区域表示 95% 的置信区间; * 表示拟合结果达显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示拟合结果达极显著水平 ($P < 0.01$)

此外,不难发现,连作对砂田表层土壤养分 (SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK、TSS) 的负效应伴随种植年限的延长而愈加强烈(图 3)。值得注意的是,与 CK 相比,4—6 年土壤 SOM、TP、TK、AK 含量的相对变化均不显著 ($P > 0.05$),其变化率仅为 0.13% (95% CI: -11.96%—13.89%)、-3.04% (95% CI: -10.92%—5.53%)、-1.62% (95% CI: -3.83%—0.65%)、-0.77% (95% CI: -5.88%—4.62%)。于 10—12 年时,土壤 SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK、TSS 含量较 CK 的相对变化效果则开始大幅提升(以整体响应特征为基准),其值分别可达 -23.33% (95% CI: -32.36%—-13.09%)、-22.00% (95% CI: -25.60%—-18.23%)、-15.58% (95% CI: -23.27%—-7.12%)、-13.12% (95% CI: -15.03%—-11.16%)、-23.16% (95% CI: -27.93%—-18.07%)、-46.62% (95% CI: -49.29%—-43.81%)、-28.46% (95% CI: -32.29%—-24.41%)、-50.77% (95% CI: -61.87%—-36.43%)。而至 16—20 年时,连作对砂田表层土壤 SOM、TN、AP、AK 含量的消耗过程进一步加剧,其相对变化率分别可达 -43.68% (95% CI: -59.60%—-21.47%)、-23.51% (95% CI: -32.01%—-13.95%)、-18.27% (95% CI: -28.68%—-6.33%)、-37.22% (95% CI: -45.82%—-27.26%);同时,连作对 TSS 含量的抑制效果亦同步加强,其相对变化率高达 -62.82% (95% CI: -79.05%—-34.01%)。

2.3 连作年限、水分状况和酸碱环境对砂田表层土壤养分特性的贡献程度及演化路径

将 Y、SWC、pH 视为影响因子,分别对连作砂田的表层土壤养分特性指标 (SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK、TSS) 进行逐步回归分析。表 2 结果显示,SWC、Y 作为土壤 SOM 的第 1 主导因子 (54.44%) 和第 2 主导因子 (-45.56%),可共同解释其 89.80% 的变异信息 ($P < 0.01$); Y、SWC 则是土壤 TN 的第 1 主导因子 (-52.47%) 和第 2 主导因子 (47.53%),能够解释其 68.50% 的变异信息 ($P < 0.01$);对于土壤 TP 而言,除 Y 对其的影响外 (-60.81%),自身所处的酸碱环境亦不容忽视 (39.19%),二者可共同解释 62.30% 的变异信息 ($P < 0.01$)。此外,SWC 成为砂田表层土壤 AP 和 TSS 演化的关键因子,可分别解释其 40.30% 和 53.40% 的变异信息 ($P < 0.01$);而 Y 则是土壤 AK 变异的主要要素,其解释度为 32.60% ($P < 0.05$)。

路径分析可直观表示影响因子对连作砂田表层土壤养分特性的作用路径及影响程度。由图 4 可知,SWC 是土壤 SOM 变异的主要决策因子 (0.654),且对 SOM 为直接正向作用 (0.589, $P < 0.01$)。同时, Y 亦通过对 SWC 的抑制效应 (-0.313) 进而实现对土壤 SOM 的间接调控; Y 则是土壤 TN 和 TP 演替的主要决策因子 (0.481、0.456),其对 TN、TP 均为直接抑制效应 (-0.499、-0.633, $P < 0.01$)。其中, Y 同样能够通过 SWC 的抑制作用 (-0.232) 进一步实现对土壤 TN 的间接调控,而 Y 通过 pH 对土壤 TP 的间接作用效果则较为微弱 (-0.044)。

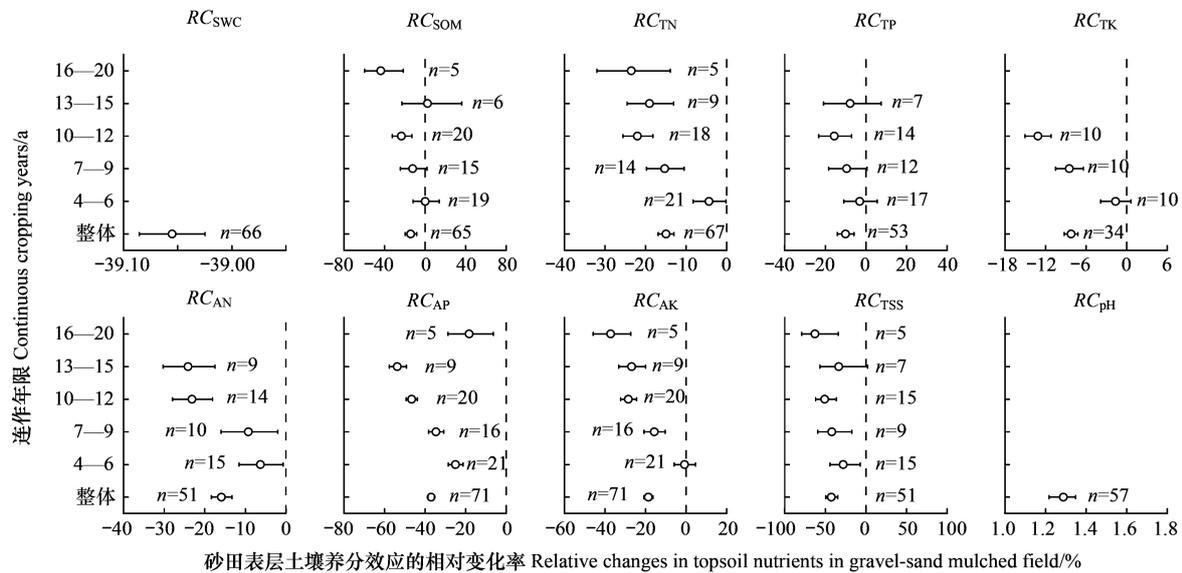


图3 砂田表层土壤养分效应对连作年限的响应特征

Fig.3 Response of topsoil nutrients to continuous cropping years in gravel-sand mulched field

RC_{SWC} : 土壤水分含量相对变化率 Relative changes in soil water content; RC_{SOM} : 土壤有机质含量相对变化率 Relative changes in soil organic matter content; RC_{TN} : 土壤全氮含量相对变化率 Relative changes in soil total nitrogen content; RC_{TP} : 土壤全磷含量相对变化率 Relative changes in soil total phosphorus content; RC_{TK} : 土壤全钾含量相对变化率 Relative changes in soil total potassium content; RC_{AN} : 土壤碱解氮含量相对变化率 Relative changes in soil alkaline nitrogen content; RC_{AP} : 土壤速效磷含量相对变化率 Relative changes in soil available phosphorus content; RC_{AK} : 土壤速效钾含量相对变化率 Relative changes in soil available potassium content; RC_{TSS} : 土壤全盐(土壤可溶性盐)含量相对变化率 Relative changes in soil total soluble salt content; RC_{pH} : 土壤 pH 值相对变化率 Relative changes in soil pH; 误差棒表示不同亚组相对变化效果的 95% 置信区间(95% CI)

需要进一步注意的是,砂田表层土壤 SOM、TN、TP 与影响因子的剩余通径系数均大于 0.30(0.319、0.561、0.614),这表明上述过程尚存在未知的因素未能充分考虑,特别是土壤物理和生物学过程的缺失。因此,对其的全面分析研究还有待持续深入。

表2 连作砂田表层土壤养分特性与影响因子的逐步回归分析

Table 2 Stepwise regression analysis of topsoil nutrient properties and influencing factors in continuous cropping gravel-sand mulched field

指标 Index	因子 Variable factor	因子相对贡献率/% Relative contributions	回归关系 Regression relationship	R^2	P	F
SOM	Y, SWC	-45.56, 54.44	$SOM = -0.20Y + 0.31SWC + 3.04$	0.898 **	0.000	52.56
TN	Y, SWC	-52.47, 47.53	$TN = -0.01Y + 0.01SWC + 0.37$	0.685 **	0.000	16.34
TP	Y, pH	-60.81, 39.19	$TP = -0.01Y + 0.13pH - 0.40$	0.623 **	0.001	12.40
TK	—	—	—	—	—	—
AN	—	—	—	—	—	—
AP	SWC	100.00	$AP = 0.40SWC + 1.56$	0.403 **	0.005	10.80
AK	Y	-100.00	$AK = -4.64Y + 171.58$	0.326 *	0.013	7.75
TSS	SWC	100.00	$TSS = 0.10SWC - 0.50$	0.534 **	0.001	18.34

Y: 连作年限 Continuous cropping years; “—”表示由于包含 3 种影响因子(Y、SWC、pH)的表层土壤养分特性数据集纳入文献数量少于 3 篇,因而未对其进行逐步回归分析; * 表示逐步回归分析结果达显著水平($P < 0.05$), ** 表示逐步回归分析结果达极显著水平($P < 0.01$)

2.4 连作砂田表层土壤养分特性的综合评价

为综合分析连作对砂田表层土壤养分特性的影响效应,对其中的 7 个有效养分指标(SOM、TN、TP、AN、AP、AK、TSS)进行主成分分析。事前检验结果显示, KMO(0.761) > 0.60, 巴特利特球形检验 $P < 0.01$, 样本数据

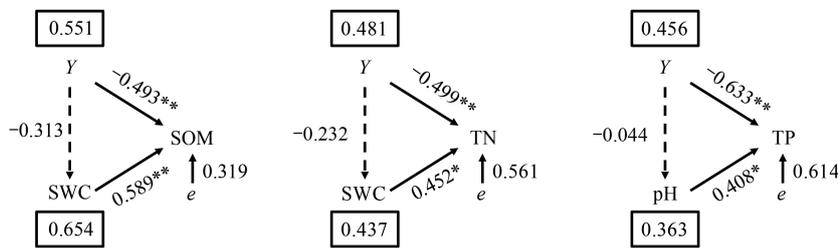


图 4 连作砂田的部分表层土壤养分特性指标(SOM、TN、TP)与影响因子的通径分析

Fig.4 Path analysis of partial topsoil nutrient properties (SOM, TN, TP) and influencing factors in continuous cropping gravel-sand mulched field

Y:连作年限 Continuous cropping years;e:剩余因子 Residual factor;实线为直接路径,虚线为间接路径,方向由原因指向结果,旁边数字为通径系数;方框内数字为决策系数;*表示直接调控作用达显著水平($P<0.05$),**表示直接调控作用达极显著水平($P<0.01$)

适合进行因子分析。由表 3 可知,提取的 2 个主成分 F1 和 F2 的特征值(4.388、1.443)均大于 1.0,其累计方差贡献率可达 83.288%。其中,F1 的方差贡献率为 62.679%,较大的因子荷载主要有 SOM、TN、AN、AP、AK 和 TSS,可表征多数的土壤养分特性信息。F2 的方差贡献率则为 20.609%,较大的因子荷载仅有 TP,重点表征连作砂田表层土壤总磷含量的变异特性。

表 3 连作砂田表层土壤养分特性主成分分析的成分矩阵、特征值和贡献率

Table 3 Component matrix, characteristic value and variance contribution for principal component analysis of topsoil nutrient properties in continuous cropping gravel-sand mulched field

主成分 Principal component	指标 Index							特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution/%	累计方差贡献率 Accumulated contribution/%
	SOM	TN	TP	AN	AP	AK	TSS			
F1	0.697	0.766	0.554	0.909	0.909	0.686	0.940	4.388	62.679	62.679
F2	0.561	0.429	-0.731	-0.170	-0.277	0.488	-0.258	1.443	20.609	83.288

在分析过程中,不同连作年限的砂田表层土壤养分特性指标的实际用值均为提取到的相应文献中有效数据的平均值;此外,由于 13—15 年的土壤 TK 和 16—20 年的部分表层土壤养分特性数据集纳入文献数量均少于 3 篇,因而并未对其进行主成分分析

基于连作砂田表层土壤养分特性的主成分分析结果,进一步对不同年限的砂田表层土壤养分效应进行综合评价(表 4)。其中,综合得分能够客观体现连作砂田表层土壤养分的整体水平。若其为正值,表示某一连作年限下的砂田表层土壤养分效应高于平均水平;反之,则表示低于平均标准^[14]。就具体年限而言,不同连作砂田(1 年、3 年、5 年、7 年、10 年、15 年)的表层土壤养分综合得分分别为 2.38、1.66、0.40、0.12、-1.47、-2.00。不难发现,连作 10 年即可显现明显的土壤养分匮乏状态($-1.47<0$),至 15 年时,砂田表层土壤养分流失过程则愈加强烈($-2.00<0$)。而在时段尺度方面,不同连作砂田(1—3 年、4—6 年、7—9 年、10—12 年、13—15 年)的表层土壤养分综合得分分别可达 1.74、0.56、0.47、-1.86、-2.00。连作 10—12 年即可表现出明显的土壤养分衰退状态($-1.86<0$)。

表 4 不同连作砂田表层土壤养分特性的综合效应评价

Table 4 Comprehensive evaluation of topsoil nutrient properties in gravel-sand mulched field with different continuous cropping years

连作年限 Continuous cropping years/a	主成分得分				连作年限 Continuous cropping years/a	主成分得分			
	Principal component score		综合得分 Overall score	综合排名 Overall ranking		Principal component score		综合得分 Overall score	综合排名 Overall ranking
	F1	F2				F1	F2		
1	3.53	-1.13	2.38	1	1—3	1.97	1.03	1.74	1
3	2.49	-0.87	1.66	2	4—6	-0.04	2.40	0.56	2
5	0.65	-0.37	0.40	3	7—9	0.03	1.84	0.47	3
7	0.35	-0.56	0.12	4	10—12	-2.47	-0.01	-1.86	4
10	-1.65	-0.92	-1.47	5	13—15	-2.42	-0.71	-2.00	5
15	-2.42	-0.71	-2.00	6					

3 讨论

3.1 砂田表层土壤养分演变特征对连作的响应机制

全面揭示、定量表征和深刻理解土壤退化的发生机理、演替过程及驱动因子,被认为是综合评估和合理发挥土壤功能的关键过程^[24]。在中国西北干旱半干旱地区,长期人类活动和自然侵蚀引起的砂田土壤肥力退化和土地生产力衰减,已成为当地特色经济产业可持续发展的瓶颈问题^[7]。因此,深刻明晰砂田表层土壤养分特性的演变动态、发展趋向和退化速率,将对地区土壤退化阻控措施的科学制定极具现实意义。

土壤养分是旱区农业生产及其可持续发展的关键要素。其中,有机质(SOM)作为陆地生态系统中最大的活性碳库以及营养组分的主要赋存载体,其周转、固存、矿化、聚集和稳定直接影响土壤肥力水平^[25]。诸多实践表明^[8-10,12-14,26],长期连作易使得砂田土壤 SOM 持续消耗,田间尺度的 SOM 含量存在明显的空间变异特性。Meta 分析的结果亦显示,表层土壤 SOM 在 1—20 年间的消耗速率远超其他养分特性指标,可达 $0.178 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.05$); 4—20 年的 SOM 含量整体可较覆砂初期(1—3 年)减少 14.21% ($P < 0.05$),至 10—12 年时,其显著降低态势逐步显现(-23.33% , $P < 0.05$)。SOM 的分解转化取决于微生物介导下的土壤“物理—化学—生物”过程的协同互动驱动,而土壤水分的有效性则是其功能结构稳定发挥的重要调节因素^[27]。因此,连作砂田表层土壤 SOM 的流失是种植时长和水分变异(SWC)共同作用的结果($P < 0.05$,图 5)。

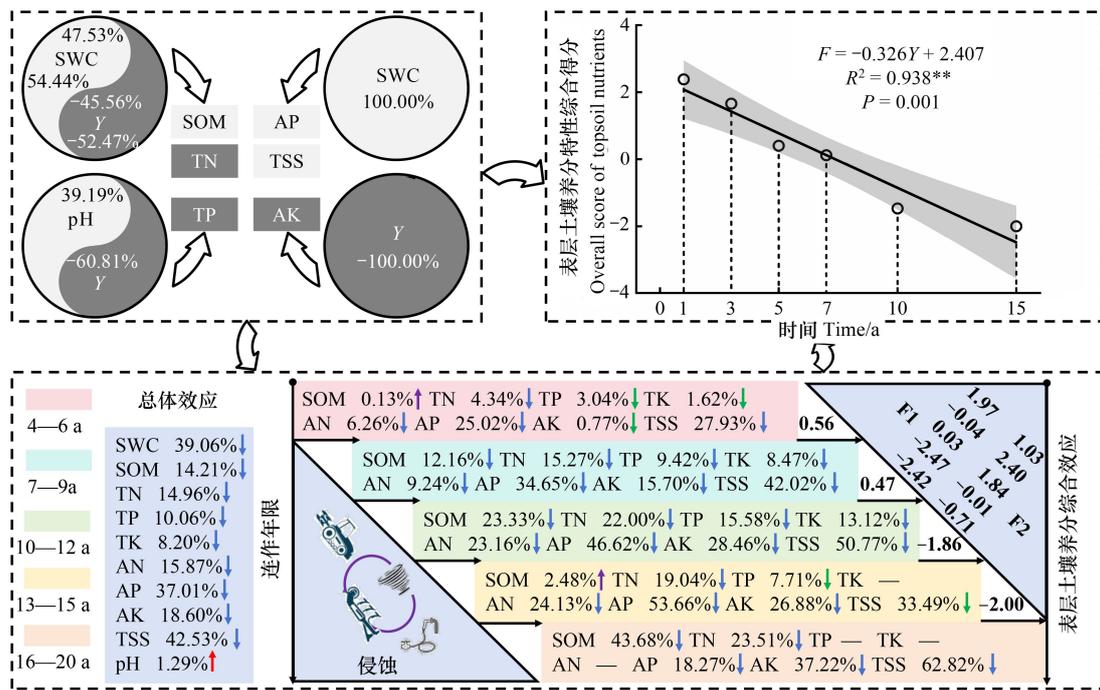


图 5 砂田表层土壤养分效应对连作的响应过程示意

Fig.5 Response of topsoil nutrients to continuous cropping in gravel-sand mulched field

F:综合得分 Overall score;图中左上、右上、下部的分图分别表示连作砂田表层土壤养分特性变异的发生机理、演替过程和综合效应,源自主文中表 2、图 3、表 4 的数据汇总;红色、蓝色短箭头分别表示各土壤养分特性指标含量的相对变化结果为显著的增加和减少效应($P < 0.05$);紫色、绿色短箭头则分别表示其相对变化结果为不显著的增加和减少效应($P > 0.05$)

然而,值得注意的是,砂田表层土壤养分对连作的具体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^[9-10]。进一步的研究结果表明,4—6 年的土壤 SOM 相对含量变化仅为 0.13% ($P > 0.05$,图 5)。与之相类似的,土壤 TP、TK 和 AK 含量于 4—6 年的相对变化效果(-3.04% 、 -1.62% 、 0.77%)亦无显著差异($P > 0.05$)。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^[7]。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,氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)

等大量元素和铁(Fe)、锰(Mn)、硼(B)、硒(Se)等微量元素从中释放并迁移至土壤表层富集^[28],而砂田的增温保墒特性则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。此外,尽管相同时段内的土壤TN和AN含量的相对变化为负值(-4.34%、-6.26%, $P<0.05$),但其降幅均处于5.00%左右;而整体较小的本底基数和过高的pH则可能是导致土壤AP含量相对变幅较大的关键致因(-25.02%, $P<0.05$)。这是因为,P对土壤化学环境较为敏感,过高的pH易使得土壤中的P形成难溶化合物,进而不断降低其有效性^[29]。同时,特别值得注意的是,土壤TN、TP、TK、AN、AP、AK含量主要于10—12年开始大幅减少(-22.00%、-15.58%、-23.16%、-13.12%、-46.62%、-28.46%, $P<0.05$),上述规律已在实际的农业生产实践中得到进一步体现^[30]。总的来看,连作砂田表层土壤SOM含量整体处于亏缺状态,其在1—6年间均能够保持较高水平;而部分土壤养分特性指标(SOM、TP、TK、AK)的亏缺过程则存在显著的时滞效应,至10—12年时,砂田表层土壤全量及其有效养分的相对含量变化方开始凸显。

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^[31]。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,使得土壤的有效养分亏缺或失衡。土壤TN、TP作为旱区砂田土壤肥力评价的关键指标^[32],其年际平均变化速率呈现显著下降态势(-0.011 g kg⁻¹ a⁻¹、-0.009 g kg⁻¹ a⁻¹, $P<0.05$);4—20年的土壤含量则分别较1—3年减少14.96%和10.06%($P<0.05$),这同以往研究相符^[8-10,12-14,26]。进一步的结果表明,土壤TN、TP的异质性主要由连作时长($P<0.01$,图5)所决定。此外,TN对SWC的响应特征亦较为明显($P<0.05$)。究其原因,水分状况能够通过改变微生物活性、酶促过程和土壤氧化还原电位进而影响N的合成、转化和循环^[33]。TP则对pH的变化较为敏感,然而,高pH范围内的适度盐碱胁迫却能够减缓由此带来的负面影响($P<0.05$),这与P在过碱环境下的溶解特性有关^[29]。而土壤TK含量和覆砂年限间的不显著正相关关系($P>0.05$),则可能是其样本容量的有限性和有效数据的变异性所致。尽管如此,4—20年的TK含量仍可较1—3年减少8.20%($P<0.05$)。

晒砂瓜(*Citrullus lanatus*)是压砂地集中分布区的主要经济作物之一。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 6.67×10^4 hm²^[6]。因此,在土壤有效养分指标方面,AN、AP、AK同样与连作年限呈现显著负相关关系(-0.797 mg kg⁻¹ a⁻¹、-0.498 mg kg⁻¹ a⁻¹、-3.981 mg kg⁻¹ a⁻¹, $P<0.05$),并整体表现出消耗“AK最多,AN次之,AP最少”的西瓜养分需求规律^[34],4—20年的土壤AN、AP、AK含量分别可较1—3年减少15.87%、37.01%和18.60%($P<0.05$)。SWC作为土壤营养元素循环和物质能量交换的重要媒介,深刻影响土壤溶液中P的溶解和扩散^[35]。因此,日益消散的土壤水分进一步导致AP的持续损耗($P<0.05$,图5)。而交换性钾作为土壤AK的关键组分^[36],其对水分胁迫的响应甚微,种植年限即成为影响土壤AK吸附、解吸、固定、交换和平衡过程的主要限制因子($P<0.05$)。

土壤肥力评价是旱区农业可持续发展的重要科学依据。相关研究显示^[14,30],在连作7年之后,砂田即可发生明显连作障碍,而至11年时,总有机碳(TOC)、总有机氮(TON)等营养组分含量严重亏缺。本文基于文献数据整合和主成分综合评价亦进一步证实,1—15年砂田表层土壤养分综合效应的退化速率可达0.326/a,10年左右可出现明显的养分贫瘠状态(图5)。因此,在实际农业生产过程中,当砂田连续种植10—12年时,应通过增加或调节外源养分的有效输入及合理配施,以有效提升农田土壤养分容量,减缓砂田性能退化进程。

3.2 砂田表层土壤保墒压盐特性对连作的响应机制

砾石覆盖由于其对土壤“水通道”和“热通道”的隔绝特性^[37-38],因而具有减蒸保墒、压碱抑盐等功效^[39]。相关研究表明^[8-10],表层土壤持水性能在连作3—5年间状况最佳。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^[40],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^[18]。Meta分析的结果进一步证实,土壤SWC含量随种植年限的延长而显著下降(-0.283 g g⁻¹ a⁻¹, $P<0.05$),4—20年的SWC则整体较1—3年缩减39.06%($P<0.05$,图5),砂田的蓄水保墒性能退化严重。因此,可通过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^[7]。

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^[41] ($P < 0.05$, 图 5)。微咸水补灌^[42]、砾石中离子析出^[43]及钙积层蓄积^[44]是其运移和重分布的主要物质来源,而覆盖层结构的恶化^[18]则是连作砂田土壤返盐效应持续发生的关键外部诱因。然而,由于砂田的逆向演替^[17]、降雨或灌溉淋洗^[18]和作物生理代谢影响^[19],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^[9]。本研究的结果亦表明,土壤 TSS 含量随连作年限呈现显著的二次多项式关系,4—20 年的土壤 TSS 含量可较 1—3 年大幅降低 42.53% ($P < 0.05$, 图 5)。此外,尽管 12 年以后的土壤 TSS 显现逐年增加态势 ($P < 0.05$),但其在 13—15 年和 16—20 年的有效含量仍可较 1—3 年减少 33.49% ($P > 0.05$) 与 62.82% ($P < 0.05$)。

土壤酸碱性是影响养分环境和肥力效应的重要指标。已有研究发现^[45],连作砂田表层土壤 pH 呈现显著碱化趋向,其在区域尺度的空间变异归因于结构性因素(土壤类型、覆盖条件、地形因子等)和随机性因素(耕作措施、施肥管理、灌溉方式等)的综合作用。Meta 分析的结果则进一步证实,4—20 年的平均土壤 pH 值为 8.70,可较 1—3 年整体提升 1.29% ($P < 0.05$)。一项野外调查取样结果显示^[4],砂田主要对土壤中的盐性离子进行有效限制(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-}),而碱性离子含量(CO_3^{2-} 、 HCO_3^{-})则会出现积聚效应,砾石覆盖对土壤盐分种类抑制或驱动的这种差异效果进一步佐证上述结论。总而言之,砂田在连作 20 年内仍具有显著抑盐效应,但长期种植引发的土壤碱化问题则不容忽视。

4 结论

(1) 砂田表层土壤水分(SWC)和养分(SOM、TN、TP、AN、AP、AK)强度均伴随种植年限的延长而显著降低($P < 0.05$),土壤 pH 和 TK 的逐年变化则不明显($P > 0.05$)。与 1—3 年相比,4—6 年土壤 SOM、TP、TK、AK 含量的相对变化均不显著($P > 0.05$),土壤 SOM、TN、TP、TK、AN、AP、AK 主要于 10—12 年开始大量流失($P < 0.05$)。

(2) 砂田在连作 12 年内具有显著压盐效果,12 年以后的表层土壤 TSS 含量则开始呈现增加态势($P < 0.05$);4—20 年的土壤 pH 整体较 1—3 年显著提升 1.29% ($P < 0.05$)。

(3) 连作年限主要对砂田表层土壤 TN、TP 和 AK 变异发挥显著的直接驱动效应($P < 0.05$);SWC 则在土壤 SOM、AP 和 TSS 的演替过程中起到关键的正向作用($P < 0.01$)。

(4) 砂田于连作 10 年左右即可出现明显的养分亏缺状态,至 13—15 年时,其表层土壤养分流失过程则愈加剧烈。1—15 年砂田表层土壤养分综合效应的衰减速率可达 0.326/a。

“砾石—土壤—微生物—植物”作为一个有机整体,各单元间相互依存、密不可分、协同演化。然而,由于相关样本数据的缺失以及现有研究的局限性,文章尚未考虑砂田表层土壤物理特性(质地结构、容重大小、孔隙特性、温度效应)、微量元素、土壤酶活性、微生物群落结构、化感物质和原生动植物等因素对连作的响应过程。因此,后续的研究有必要持续扩展、深度挖掘、综合考量、合理引用多元化的土壤肥力评价指标,以进一步检验 Meta 分析结果的合理性、稳定性、可靠性和准确性。

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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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(13): 181-185.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 王超. 连作砂田土壤质量演变研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [15] 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.
- [16] 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(3): 168-172.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Glass G V. Primary, secondary, and meta-analysis of research. Educational Researcher, 1976, 5(10): 3-8.
- [21] Zhou Z H, Wang C K, Zheng M H, Jiang L F, Luo Y Q. Patterns and mechanisms of responses by soil microbial communities to nitrogen addition. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 115: 433-441.
- [22] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [23] Rosenthal R. The file drawer problem and tolerance for null results. Psychological Bulletin, 1979, 86(3): 638-641.
- [24] 张甘霖, 史舟, 朱阿兴, 王秋兵, 吴克宁, 史志华, 赵永存, 赵玉国, 潘贤章, 刘峰, 宋效东. 土壤时空变化研究的进展与未来. 土壤学报, 2020, 57(5): 1060-1070.
- [25] Hoffland E, Kuypers T W, Comans R N J, Creamer R E. Eco-functionality of organic matter in soils. Plant and Soil, 2020, 455: 1-22.
- [26] 王超, 王建宇, 王菲, 潘佳颖. 中卫市压砂地土壤有机质空间变异特点研究. 土壤通报, 2016, 47(2): 287-293.
- [27] Charlotte V, Manhattan L, Nicolas H, Marie-Liesse A, Cyril G, Patricia G, Marie-France D, David H, Comelia R. How does soil water status influence the fate of soil organic matter? A review of processes across scales. Earth-Science Reviews, 2022, 234: 104214.
- [28] 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.
- [29] Andersson K O, Tighe M K, Guppy C N, Milham P J, McLaren T I. The release of phosphorus in alkaline vertic soils as influenced by pH and by anion and cation sinks. Geoderma, 2016, 264: 17-27.
- [30] Qiu Y, Xie Z K, Wang Y J, Malhi S S, Ren J L. Long-term effects of gravel-sand mulch on soil organic carbon and nitrogen in the Loess Plateau of northwestern China. Journal of Arid Land, 2015, 7(1): 46-53.
- [31] 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.
- [32] 张兴. 砂田土壤生化性质空间异质性分析及质量综合评价[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [33] Wang G S, Huang W J, Zhou G Y, Mayes M A, Zhou J Z. Modeling the processes of soil moisture in regulating microbial and carbon-nitrogen cycling. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124777.
- [34] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 砂田西瓜矿质养分吸收规律. 中国瓜菜, 2020, 33(12): 44-47.
- [35] DeLonge M, Vandecar K L, D'Odorico P, Lawrence D. The impact of changing moisture conditions on short-term P availability in weathered soils. Plant and Soil, 2013, 365(1): 201-209.
- [36] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [37] Qiu Y, Xie Z K, Wang Y J, Ren J L, Malhi S S. Influence of gravel mulch stratum thickness and gravel grain size on evaporation resistance. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1908-1913.
- [38] Bonachela S, López J C, Granados M R, Magán J J, Hernández J, Baille A. Effects of gravel mulch on surface energy balance and soil thermal regime in an unheated plastic greenhouse. Biosystems Engineering, 2020, 192: 1-13.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 潘佳颖, 王建宇, 王超. 宁夏压砂地土壤全盐量和 pH 值的空间变异分析. 北方园艺, 2016(3): 157-162.