

丛安琪,詹瑾,王宁,等.长期耕作对半干旱区人工沙质稻田土壤理化性质及酶活性的影响[J].中国沙漠,2026,46(3):187-194.

长期耕作对半干旱区人工沙质稻田土壤 理化性质及酶活性的影响

丛安琪^{1a,b,2},詹瑾³,王宁⁴,张铜会^{1b},刘新平^{1ab}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 a.干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, b.内蒙古奈曼农田生态系统国家野外科学观测研究站,甘肃兰州730000; 2.中国科学院大学,北京100049; 3.甘肃省治沙研究所甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,甘肃兰州730070; 4.甘肃省农业科学院作物研究所,甘肃兰州730070)

摘要:为揭示半干旱区沙地人工沙质稻田连续耕作后土壤变化,以地处科尔沁沙地南部边缘的库伦旗北部地区为研究区域,对不同种植年限(1、5、10、15、20、27 a)的人工沙质稻田及其邻近的沙丘土(对照CK)理化性质及4种土壤酶活性指标进行测定及分析。结果表明:(1)稻田耕作年限增加显著降低土壤表层pH和容重,增加电导率;中粗砂含量显著降低,极细砂及黏粉粒含量显著增加。土壤有机质含量显著增加,最大增幅为199.5%;土壤全氮含量显著增加,最大增幅为161.1%;(2)随耕作年限的增加,土壤脲酶、土壤过氧化氢酶和土壤磷酸酶的活性显著提高,土壤蔗糖酶先升高再降低。这表明人工沙质稻田技术显著影响土壤理化性质及土壤酶活性,合理的人工干扰是半干旱沙地土壤改良、生态治理的有效措施。

关键词:科尔沁沙地;人工沙质稻田技术;土壤理化性质;土壤酶活性;新成土

文章编号:1000-694X(2026)03-187-08

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00003

中图分类号:P941.73

文献标志码:A

0 引言

土壤理化性质和土壤酶活性是土壤质量的重要指标^[1],土壤酶活性在养分转化循环、有机质分解等方面起着关键的调节作用^[2-3]。如蔗糖酶参与有机碳累积与分解转化^[4];过氧化氢酶与土壤有机质转化相关^[5];土壤脲酶参与土壤中氮分解和循环,促进土壤氮素转化^[6];磷酸酶可将有机磷化合物水解并将其转化为不同形式的无机磷供给植物吸收^[3]。利用土壤酶活性能够客观地评估土壤肥力状况,探讨土壤酶活性的变化对评估各类土地土壤养分和土壤质量,特别是对评价高强度干扰后沙土土壤变化具有重要意义^[7]。

内蒙古自治区包含五大沙漠、四大沙地,曾是中国荒漠化危害最严重的省(区)之一。20世纪80—90年代,土地沙质荒漠化(沙漠化)的发生使全区

将近1/2的沙区土地生产力低下^[8],无法得到有效的治理和利用。针对沙漠化土地的治理,学者们提出了多种措施,合理的人为干扰(指在人类有目的经济活动下,对土地利用使其朝着有利于环境改善方向发展的干扰,如人工造林、人工草地、灌溉农田、农田防护林等)是常见的治理手段。目前可通过人工干扰(种植/改造)进行沙地综合治理的潜在沙地约20万km²。针对治理,国内外利用衬膜技术对不同作物进行小范围试验。20世纪60年代初学者把塑料膜铺设于沙地下种植蔬菜作物(西红柿、黄瓜等)^[9];1965年日本水稻专家松岛省三等^[10]在沙地里进行水稻栽培尝试,后因多种原因中断了试验;1980年初陈彩富等^[11]和程道远等^[12]在沙坡头地区的流动沙地进行地下隔水层(塑料膜、沥青膜)铺设,种植了大豆等作物^[13]。1991—1994年针对科尔

收稿日期:2025-10-27; 改回日期:2026-02-02

资助项目:内蒙古自治区防沙治沙科技创新重大示范工程“揭榜挂帅”项目(2024JBGS0005-1);中国科学院区域发展青年学者项目;干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室交叉创新团队项目(E451890201)

作者简介:丛安琪(1990—),女,辽宁铁岭人,主要从事土壤生态学方面的研究。E-mail:angelcong1990@163.com

通信作者:张铜会(E-mail:zhangth@lzb.ac.cn);刘新平(E-mail:liuxinping@lzb.ac.cn)

沁沙地农牧交错带生态环境整治与恢复,科研人员研发了人工沙质稻田技术(沙地衬膜水稻技术):主要是在流动、半流动沙丘被推平的土层内铺设隔水层(塑料膜),消除沙丘土壤漏水漏肥的弊端和地形起伏较大不利于耕作的影响,并利用风沙土松散通透、增温迅速以及肥效转化快等优良理化特性,不仅可获高产,而且又省水肥^[14],充分发挥了半干旱沙地的土地资源、光热资源,使沙丘地的生物量由原来 $481.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以下增加为种植水稻后的 $18\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[15],提高约37.4倍。虽已进行了多种相关试验,因人力劳动量大、工程费高、一次性投资较高等原因以及未与沙地生态建设有机结合而均未得到应用推广。

人工沙质稻田技术研发成功后在多个地区开展试验。1996年冯仲云等^[16]应用人工沙质稻田技术种植水稻并获得丰收;1998年任珺等^[17]利用此技术种植小麦;干旱荒漠区樟子松育苗^[18]、草坪种植^[19]、黄土丘陵区造林^[20]等使用人工沙质稻田技术。随着人口数量不断增加,对粮食的需求量持续攀升,水稻种植对治理沙地、改善沙区人民的膳食结构及增加单位面积的产值或者经济效益起到非常重要的作用。自20世纪90年代初在通辽市奈曼旗和库伦旗开始推广此技术,将平缓沙丘地人工改为稻田使用。此技术的推广初期由于只能人工挖土、铺膜,沙土铺设深度(30 cm)仅能保证水稻的正常生长;2010年后伴随农业机械化的发展,开始使用机器挖掘和进行膜的铺设,土层深度可达60~100 cm。目前对其栽培技术^[21-22]、土壤碳氮磷钾库容^[23-24]、微生物多样性^[25]等已开展了多项研究,但都为短时间的稻作(如最长的为10年的耕作时间),缺少较长时段耕作对比,缺少对此类沙土在人工强度干预下的演变和改良作用研究。因此,本试验基于前期踏查发现最长有连续27年种植水稻的情况,研究不同种植年限对半干旱区人工沙质稻田土壤理化性质和土壤酶活性的影响,为人工沙质稻田土壤演化、可持续利用及沙质稻田管理技术的完善提供科学依据及技术支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国北方农牧交错带的科尔沁沙

地南部边缘库伦旗($42^{\circ}21' - 43^{\circ}14' \text{N}$, $121^{\circ}09' - 122^{\circ}21' \text{E}$)的北部区域,地带性土壤为沙质栗钙土及沙质黑钙土,但目前以退化的风沙土为主。气候类型为温带半干旱大陆性季风气候,年蒸发量 $1\ 982 \sim 2\ 210 \text{ mm}$,年平均气温 $6.2 \sim 6.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期为 $143 \sim 156 \text{ d}$, $\geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为 $3\ 000 \sim 3\ 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 $383.7 \sim 447.5 \text{ mm}$,年平均风速为 $3.7 \sim 4.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[26-27]。

1.2 样品采集及测定方法

在2022年对库伦旗额勒顺镇和茫汗苏木进行沙质稻田前期调研,发现长期种植均为农户自家种植,大多分布在房前屋后,面积大小不一;底肥以农家肥(牛粪、羊粪: $10\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)为主,追肥以化肥(尿素: $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)为主。选取种植面积相近,施肥、日常管理、浇水情况基本一致的样地,于2023年11月在水稻收获后对不同耕作年限的沙质稻田土壤进行取样,分别为1、5、10、15、20、27 a以及各自附近的沙丘土壤(CK)。每个耕作年限设置4个重复,通过五点法分层采集0~10、10~20 cm土壤,同一层所取土壤混合均匀后密封于自封袋中,之后过2 mm筛处理后,新鲜土壤放置 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存备用,用于测定土壤酶活性;风干土壤室内阴凉处保存备用,用于测定土壤理化性质。

参照《土壤农化分析》^[28]的方法进行土壤理化性质分析;采用环刀法测定土壤容重(BD);采用便携式电化学分析仪HQ30d测定土壤pH(水土比2.5:1)、土壤电导率(EC)(水土比5:1)^[29];有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;全氮采用全自动定氮仪测定。土壤蔗糖酶、土壤脲酶、土壤过氧化氢酶和土壤磷酸酶活性均为酶试剂盒测定^[30],使用酶标仪分别在540、578、510、405 nm波长下读取吸光值。

1.3 数据处理

利用Microsoft Excel 2019软件进行数据初步汇总与处理;采用S-W检验对所有变量数据进行正态性检验,均符合正态分布,可直接用于统计分析;使用统计软件进行单因素方差分析与检验不同水稻种植年限对各变量指标的影响,用P值判别指标之间的变异显著性;利用Origin 2026软件对数据进行作图,利用Pearson相关系数评价半干旱区沙质稻田土壤中理化性质与酶活性的相关变化。

2 结果与分析

2.1 耕作年限对土壤主要理化性质的影响

2.1.1 耕作年限对土壤pH、电导率的影响

如表1所列,随着耕作年限的增加,沙质稻田土壤pH值显著降低($P<0.05$),最低可达到5.7。而土壤电导率随着水稻耕作年限增加显著增加($P<0.05$)。如表层(0~10 cm)土壤电导率增加幅度最大,与对照相比,其增加量达到363.59%。

表1 耕作年限对人工沙质稻田土壤pH和电导率的影响

Table 1 Effect of cropping years on soil pH and electrical conductivity in artificial sandy paddy

耕作年限 /a	土壤理化性质		
	pH	电导率 /($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	容重 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
0~10 cm 土层			
CK	7.02±0.06 ^a	31.17±5.30 ^b	1.55±0.01 ^a
1	7.00±0.39 ^a	63.75±7.65 ^b	1.52±0.01 ^{ab}
5	6.37±0.40 ^{ab}	133.25±15.89 ^a	1.46±0.02 ^{bc}
10	6.16±0.26 ^{ab}	151.53±21.73 ^a	1.45±0.01 ^{bc}
15	6.03±0.23 ^b	153.98±26.65 ^a	1.44±0.05 ^{bc}
20	5.70±0.18 ^b	150.70±23.48 ^a	1.38±0.03 ^c
27	5.91±0.32 ^b	144.50±14.52 ^a	1.44±0.02 ^{bc}
10~20 cm 土层			
CK	6.98±0.02 ^{ab}	31.00±5.12 ^c	1.54±0.02 ^{bcd}
1	7.15±0.26 ^a	67.75±9.23 ^{bc}	1.63±0.01 ^a
5	6.90±0.34 ^{ab}	159.30±23.55 ^a	1.52±0.02 ^{cd}
10	6.71±0.24 ^{abc}	136.93±26.37 ^a	1.58±0.01 ^{bc}
15	6.57±0.32 ^{abc}	120.73±5.17 ^{ab}	1.57±0.02 ^{bc}
20	6.01±0.14 ^c	145.88±24.47 ^a	1.51±0.02 ^d
27	6.29±0.04 ^{bc}	108.55±11.84 ^{ab}	1.59±0.03 ^{ab}

注:同一列不同字母表示同一指标差异显著($P<0.05$)。

2.1.2 耕作年限对土壤容重、机械组成的影响

如表1所列,随水稻耕作年限增加,土壤容重变化显著($P<0.05$)。与对照相比,耕作层(0~20 cm)容重呈显著降低趋势,由 $1.55\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 降至 $1.38\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

水稻耕作年限对土壤的机械组成影响显著($P<0.05$,表2)。随耕作年限的增加中粗砂($>0.25\text{ mm}$)含量显著降低,如0~10 cm土层的中粗砂含量由45.21%降至32.17%,10~20 cm土层由44.13%降至32.35%。极细砂(0.05~0.10 mm)及黏粉粒(<0.05

mm)含量显著增加,如0~10 cm土层的极细砂含量增长了175.2%,黏粉粒含量增加了97.8%。

2.1.3 耕作年限对土壤有机质、全氮含量的影响

由图1可见,随耕作年限的增加土壤有机质含量呈现显著的增加趋势($P<0.05$)。如表层(0~10 cm)土壤有机质含量由 $2.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至 $6.41\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,增长199.5%;10~20 cm土层有机质含量由 $2.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至 $6.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,增长187.2%。土壤全氮含量也表现出相同的增加趋势。如随着耕作年限增加,表层(0~10 cm)土壤中全氮含量由 $0.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 显著增至 $0.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$),增长161.1%;10~20 cm土层中全氮含量由 $0.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至 $0.35\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,增长133.3%。以上结果表明人工沙质稻田技术有利于稻田耕作层土壤有机质以及表层土壤全氮的积累。

2.2 耕作年限对土壤酶活性的影响

人工沙质稻田耕作年限增加对土壤各类酶活性都产生了显著影响($P<0.05$),但其变化各不相同(图2)。如土壤蔗糖酶呈先上升后下降趋势,在5 a时达到最高。土壤脲酶活性显著增加,在0~10 cm土层中,脲酶活性显著增加了125%;在10~20 cm土层中,脲酶活性显著增加98.5%。而土壤过氧化氢酶活性与蔗糖酶活性变化一致都呈现先上升后下降趋势,但在15 a达到最高,均高于对照。土壤磷酸酶活性显著增加,且均高于对照。

2.3 土壤理化性质与土壤酶活性相关性

Pearson相关性分析表明,人工沙质稻田经过长期种植,在0~10 cm土壤中,pH与电导率、全氮、脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶呈极显著负相关($P<0.01$),与有机质呈显著负相关($P<0.05$);pH与容重呈显著正相关($P<0.05$);有机质与全氮呈极显著正相关($P<0.001$);有机质与蔗糖酶呈显著负相关($P<0.01$);容重与全氮、脲酶呈显著负相关($P<0.01$,图3A)。在10~20 cm土壤中正负相关性与0~10 cm基本一致,但无显著性(图3B)。

3 讨论

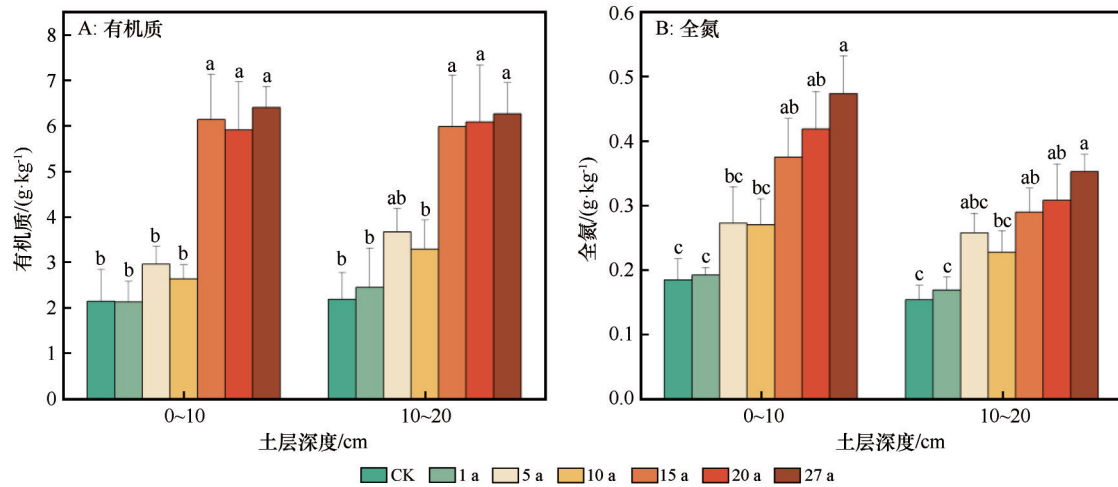
科尔沁沙地风沙土属于砂质新成土^[31],有研究表明^[32],旱地红壤改种水稻后,不同种植年限水稻表层土壤pH显著提高,但土壤pH增加主要发生在种稻开始的7 a间,此后土壤pH变化趋于稳定;前人研究结果^[33]表明试验持续时间超过20 a时,施氮

表2 耕作年限对人工沙质稻田土壤机械组成的影响

Table 2 Effect of cropping years on soil mechanical composition in artificial sandy paddy

耕作年限/a	不同粒径土壤机械组成/%			
	>0.25 mm	0.10~0.25 mm	0.05~0.10mm	<0.05 mm
0~10 cm 土层				
CK	45.21±3.97 ^a	43.15±1.82 ^a	3.03±1.23 ^b	8.60±1.84 ^c
1	44.74±1.41 ^a	41.93±0.73 ^a	3.22±0.95 ^b	10.11±1.14 ^{bc}
5	39.37±3.23 ^{ab}	41.40±1.57 ^a	4.73±1.47 ^{ab}	14.49±0.47 ^{ab}
10	41.29±3.70 ^{ab}	41.48±0.89 ^a	4.43±1.34 ^{ab}	12.79±1.70 ^{abc}
15	41.72±3.37 ^{ab}	41.70±1.18 ^a	5.48±1.78 ^{ab}	11.10±2.48 ^{bc}
20	35.76±2.17 ^{ab}	43.94±1.30 ^a	7.55±1.34 ^{ab}	12.75±2.09 ^{abc}
27	32.17±1.98 ^b	42.48±2.00 ^a	8.34±1.74 ^a	17.01±1.74 ^a
10~20 cm 土层				
CK	44.13±1.24 ^a	45.18±1.21 ^a	3.53±1.66	8.41±0.93 ^b
1	41.65±1.69 ^{ab}	43.14±1.19 ^{ab}	2.82±0.77 ^c	12.39±0.71 ^{ab}
5	38.81±3.53 ^{abc}	41.02±1.04 ^b	5.23±1.51 ^{bc}	14.95±1.11 ^a
10	41.99±2.46 ^{ab}	41.92±0.90 ^{ab}	3.65±0.55 ^c	12.44±1.35 ^{ab}
15	43.14±2.14 ^a	41.47±1.24 ^{ab}	4.22±1.33 ^{bc}	11.18±1.52 ^{ab}
20	35.32±0.85 ^{bc}	43.48±1.92 ^{ab}	7.60±1.01 ^{ab}	13.60±1.68 ^a
27	32.35±2.18 ^c	42.37±0.74 ^{ab}	10.09±0.57 ^a	15.20±1.77 ^a

注:同一列不同字母表示同一指标差异显著($P<0.05$)。



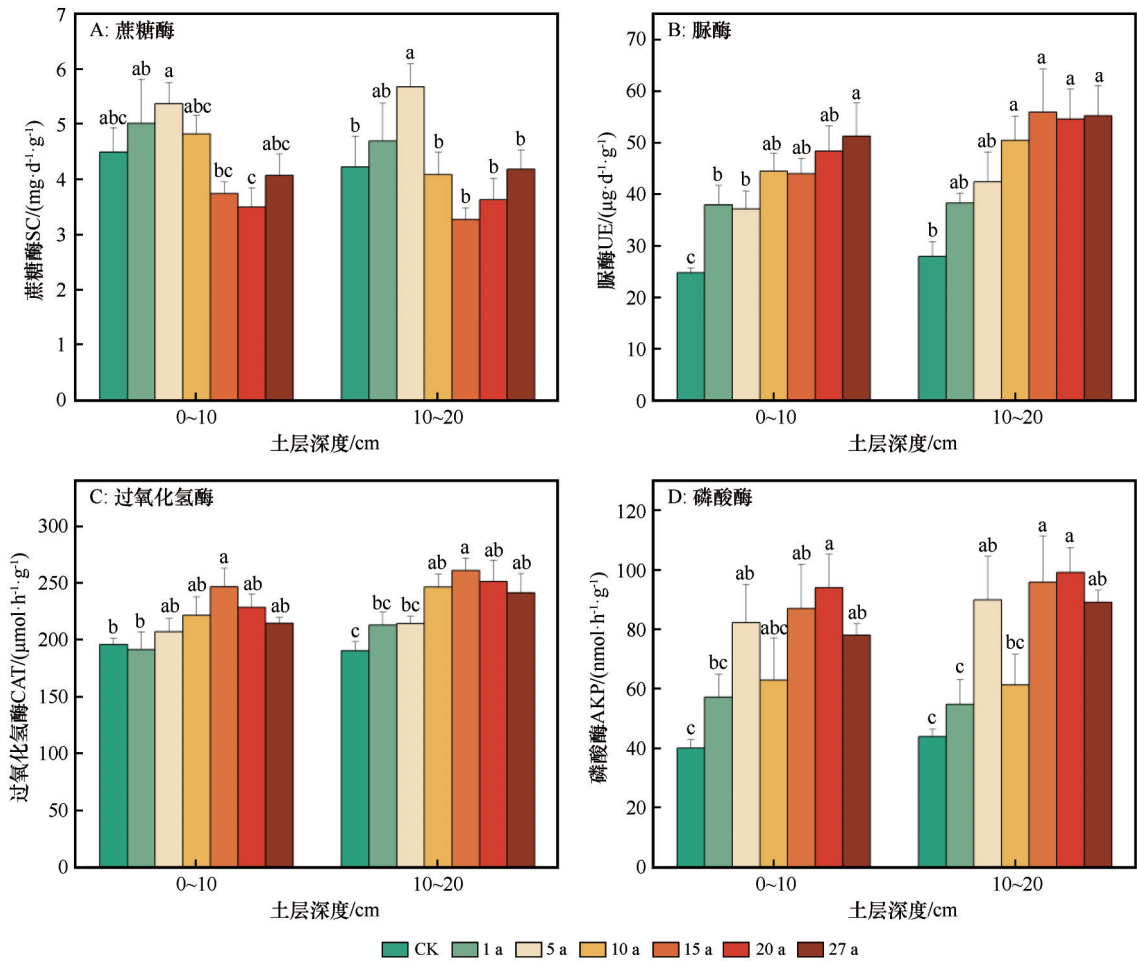
注:不同字母表示相同土层同一指标差异显著($P<0.05$)

图1 耕作年限对人工沙质稻田土壤有机质和全氮含量的影响

Fig.1 Effects of various cropping years on soil organic matter and total nitrogen content in artificial sandy paddy

对土壤酸化的影响减弱。本研究表明由于有机肥与无机肥持续施用,随耕作年限增加,沙质稻田土壤pH变化显著。表层土壤pH由于 NH_4^+ 的硝化作用使其趋于酸性^[34],当耕作超20 a后,土壤pH变化程度趋缓;10~20 cm土壤由于水中盐碱不能淋溶流

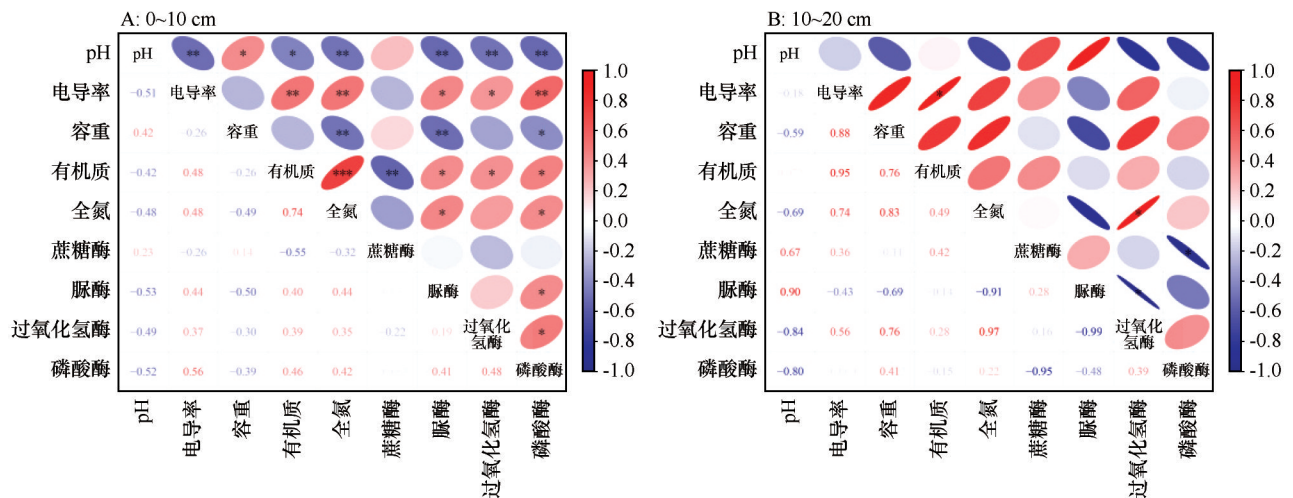
失,逐渐在稻田内积累,使得稻田土壤pH值增加。土壤电导率也因为淋溶累积而增加,表层增加幅度最大。前人研究发现,随着植物种植年限的改变,土壤容重的变化不尽相同,成毅^[35]对植被恢复的土壤研究表明其容重随着种植年限的增加而减小,与



注：不同字母表示相同土层同一指标差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 耕作年限对人工沙质稻田土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶活性的影响

Fig.2 Effect of cropping years on soil sucrase, urease, catalase, and phosphatase activities in artificial sandy paddy



注：*、**和***分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平上显著

图 3 不同土层土壤理化性质与土壤酶活性相关关系

Fig.3 Correlation diagram between soil physicochemical properties and soil enzyme activity in different soil layers

本研究的结果一致,由于每年整地翻耕以及表层根系的生长起到作用,10~20 cm 土壤容重增加则是

塑料膜隔开,经年逐步夯实导致。本研究中土壤的中粗砂含量显著降低,极细砂及黏粉粒含量显著增

加与谢青琰等^[36]对高寒草甸土壤研究中随着种植年限的延长,土壤粒径呈变细趋势的结论一致。旱地红壤改种水稻后,水稻土0~20 cm的土壤有机质含量随着种植年限增加而显著增加($P<0.05$),在耕作的80 a的时间序列内,旱地红壤水稻土壤的表层有机质含量显著增加,从 $11.25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 $34.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,增加幅度达到203%^[32]。宁德富等^[37]发现随着水稻种植年限的增加,土壤有机质含量逐渐增加。本研究土壤中表层有机质含量随耕作年限增加而增加,0~10 cm最大增幅为199.5%,10~20 cm最大增幅为187.2%,这是由于留茬耕作、根分泌物和根残体等作用,以及铺设塑料膜防止有机质的淋失增加土壤有机质。有研究表明^[38],不同种植年限的水稻全氮与种植年限呈正相关,100 a后升势减缓,700 a后略有下降。本研究中土壤表层土全氮含量显著增加($P<0.05$),表层(0~10 cm)土壤中最大增幅为165.0%,10~20 cm最大增幅100.0%。这说明人工沙质稻田技术有利于土壤碳氮积累,提高土壤养分含量。

近年来土壤酶活性是各类农田土壤变化研究的重要方向,与稳定的土壤化学性质相比,土壤酶活性对环境变化更敏感,且能够在较短时期内反映土壤状况变化^[39]。乌鲁木齐米东区水稻地不同连作年限土壤酶活性的变化为随种植年限增加土壤蔗糖酶的活性有先下降后上升的趋势;脲酶活性呈上升的趋势,但上升的幅度不显著;过氧化氢酶活性有先降后升的趋势^[40]。在不同覆膜连作年限下,土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性随覆膜连作年限的增加呈先升高后降低趋势,土壤过氧化氢酶活性随不同覆膜连作年限并无显著变化^[41]。本研究中土壤蔗糖酶呈先上升后下降趋势;脲酶随耕作年限增加显著增加,这与有机肥和无机肥的连续施加有关;过氧化氢酶呈上升趋势,与土壤中有有机质含量逐年升高有关;磷酸酶呈显著上升说明了土壤中有效磷含量升高。本研究的土壤为沙土,其本身养分含量及酶活性程度均较低,故其变化程度不尽相同;也可能因为长期连续的氮肥添加增加土壤中碳、氮循环相关酶活性。沙地水稻不同种植时间的土壤理化性质与酶活性之间存在显著相关关系,这与前人研究结果相同^[42-43],但影响土壤酶活性的具体相关物质存在差异,这可能是由于种植的作物不同,对土壤的养分需求存在差异。

本研究中有机质和全氮与对照相比增加,土壤酶活性与对照相比呈现增加趋势。由于有机无机肥连年施加,凋落物及根茬增加以及灌溉的影响,4种酶活性都呈现出增加趋势,高强度的人工干扰使沙土中的生物活性增加,对土壤的改良和土壤的变化呈现积极作用。

4 结论

在半干旱区利用人工沙质稻田技术种植水稻。随着种植年限的增加,沙土的土壤理化性质及酶活性均有显著变化,其变化趋势均朝着成土的演变方向进行,主要表现在为与对照相比,表层(0~10 cm)土壤pH显著降低,土壤容重显著降低,粒径组成中黏粉粒含量显著增加,土壤有机质和全氮含量显著增加,土壤蔗糖酶、土壤过氧化氢酶、土壤脲酶、土壤磷酸酶活性均显著增加。

参考文献:

- [1] 任万军,黄云,吴锦秀,等.免耕与秸秆高留茬还田对抛秧稻田土壤酶活性的影响[J].应用生态学报,2011,22(11):2913-2918.
- [2] Xiao L, Liu G B, Li P, et al. Ecological stoichiometry of plant-soil-enzyme interactions drives secondary plant succession in the abandoned grasslands of Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2021, 202: 105302.
- [3] Zornoza R, Guerrero C, Mataix J, et al. Assessing air-drying and rewetting pre-treatment effect on some soil enzyme activities under Mediterranean conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8): 2125-2134.
- [4] Li S, Zhang S R, Pu Y, et al. Dynamics of soil labile organic carbon fractions and C-cycle enzyme activities under straw mulch in Chengdu Plain [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 289-297.
- [5] 高丽超,郑文魁,郭新送,等.控释肥配施玉米秸秆对麦季土壤酶活性及养分的影响[J].水土保持学报,2022,36(6): 356-363.
- [6] 边雪廉,赵文磊,岳中辉,等.土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展[J].中国农学通报,2016,32(4): 171-178.
- [7] 陈月鹏,李石开,安波,等.亚热带树种的菌根和根外菌丝对土壤氮矿化及酶活性的影响[J].应用生态学报,2023,34(5): 1235-1243.
- [8] 王康富.内蒙科尔沁沙地奈曼地区沙漠化土地综合整治初步研究[J].中国沙漠,1989,9(1):33-37.
- [9] 黄学文,严哲洙.沙地薄膜水稻栽培研究[J].中国沙漠,1995,15(1):17-24.
- [10] 松岛省三.水稻栽培新技术[M].长春:吉林人民出版社,1987.

- [11] 陈彩富,钱太涛. 流动沙丘的改良利用与经济效益:以沙坡头地区为例[J]. 中国沙漠,1984,4(3):36-44.
- [12] 程道远,陈文瑞,赵小玲,等. 流沙地铺设沥青隔水层防渗试验报告[J]. 中国沙漠,1986,6(2):52-56.
- [13] 张雄,山颖,张继平,等. 沙地衬膜水稻施肥效应与技术研究[J]. 水土保持学报,2006,20(1):139-142.
- [14] 刘新民,黄学文,赵哈林. 农牧交错带沙漠化逆转对策和沙地节水种稻生态模式[J]. 中国沙漠,1995,15(1):1-6.
- [15] 赵哈林,黄学文. 沙地薄膜水稻的效益和应用前景[J]. 中国沙漠,1995,15(1):83-91.
- [16] 冯仲云,杨泰运. 沙丘地种植水稻试验的新进展[J]. 中国沙漠,1997,17(2):212-213.
- [17] 任琚,王辉,周晓雷,等. 沙地衬膜小麦土壤水分动态的研究[J]. 甘肃农业大学学报,2000,35(2):152-156.
- [18] 满多清,徐先英,吴春荣,等. 干旱荒漠区沙地衬膜樟子松育苗技术研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3):170-173.
- [19] 刘金荣,谢晓蓉,孙吉雄,等. 干旱荒漠区沙地衬膜种植草坪的技术研究[J]. 林业科学,2005,41(6):89-93.
- [20] 曹世雄,冷平生,陈莉,等. 黄土丘陵区穴衬膜造林技术[J]. 北京林业大学学报,2005,27(3):1-5.
- [21] 崔海红,关奎. 沙地衬膜水稻主要栽培技术[J]. 农民致富之友,2019(11):38.
- [22] 窦瑞霞,孙玉梅. 沙地衬膜水稻栽培技术[J]. 现代农业,2017(10):51.
- [23] 孙琳,欧阳,于飞,等. 沙地衬膜水稻田休耕对土壤氮磷钾库容的影响[J]. 地球科学前沿,2022,12(4):440-447.
- [24] 孙琳,欧阳,于飞,等. 衬膜水稻修复荒漠化土壤对土壤碳库变化的影响[J]. 土壤科学,2022,10(2):70-77.
- [25] 付金晶,安迪,孙琳,等. 衬膜水稻技术对荒漠化土壤微生物多样性的修复效果研究[J]. 地球科学前沿,2021,11(4):435-448.
- [26] 陈宇. 通辽市库伦三大寺院景观研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
- [27] 李雪莹,李玉宝,梁伟. 基于SOM神经网络的通辽市库伦旗森林健康评价[J]. 内蒙古林业调查设计,2021,44(4):68-74.
- [28] 鲍土旦,秦怀英,劳家怪. 土壤农化分析[M]. 中国:农业出版社,1988.
- [29] 詹瑾,丛安琪,李玉霖,等. 长期氮沉降和地上凋落物处理对半干旱区沙质草地表层土壤碳氮组分的影响[J]. 水土保持学报,2023,37(4):227-234.
- [30] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34:1309-1315.
- [31] 李福兴,陈隆亨,邸醒民,等. 中国砂质新成土的系统分类[J]. 中国沙漠,2001,21(增刊1):30-37.
- [32] 马良,徐仁扣. 不同耕种年限红壤性水稻土理化性质的变化特征[J]. 土壤,2010,42(4):560-563.
- [33] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2):024019.
- [34] Meng C B, Xing Y T, Zhang Q C, et al. Soil acidification induced variation of nitrifiers and denitrifiers modulates N₂O emissions in paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 882:163623.
- [35] 成毅. 宁南山区植被恢复对不同粒径土壤团聚体中微生物多样性分布的影响[D]. 陕西咸阳:西北农林科技大学,2011.
- [36] 谢青琰,张梦瑶,高永恒. 青藏高原不同年限日光温室中高寒草甸土壤机械组成、养分与微生物活性变化[J]. 生态与环境学报,2016,32(4):603-608.
- [37] 宁德富,孔丽琼,汤娜,等. 不同种植年限蔬菜地土壤养分变化规律研究[J]. 四川农业大学学报,2016,34(1):67-72.
- [38] 王晋,庄舜尧,朱兆良. 不同种植年限水田与旱地土壤有机氮组分变化[J]. 土壤学报,2014,51(2):286-294.
- [39] 许云翔,何莉莉,刘玉学,等. 施用生物炭6年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J]. 应用生态学报,2019,30(4):1110-1118.
- [40] 冶伟立,陈新燕,宋菲菲,等. 不同水稻种植年限对土壤酶活性的影响研究[J]. 天津农业科学,2012,18(4):50-52.
- [41] 苟燕如,杨京京,柴强,等. 不同覆膜连作年限对玛纳斯县棉田土壤质量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(6):192-200.
- [42] 南丽丽,郁继华,郭全恩,等. 苜蓿不同种植年限对土壤化学性状及酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(10):100-105.
- [43] 曹慧,杨浩,孙波,等. 不同种植时间菜园土壤微生物生物量和酶活性变化特征[J]. 土壤,2002(4):197-200.

Effects of long-term cultivation on soil physicochemical properties and enzyme activities of artificial sandy paddy field in semi-arid region

Cong Anqi^{1ab,2}, Zhan Jin³, Wang Ning⁴, Zhang Tonghui^{1b}, Liu Xiping^{1ab}

(1. a. *State Key Laboratory of Ecological Security and Sustainable Development in Arid Regions* / b. *Inner Mongolia Naiman Agroecosystem National Field Observation and Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Gansu Minqin National Field Observation & Research Station on Ecosystem of Desert Grassland, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China*; 4. *Institute of Crop Sciences, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China*)

Abstract: To investigate soil changes in artificially sandy paddy fields after continuous cultivation in semi-arid sandy regions, the study region was selected in northern Hure Banner, located at the southern edge of the Horqin Sandy Land. The physicochemical properties and four soil enzyme activity indicators were measured and analyzed for artificially created sandy paddy fields with different cultivation durations (1, 5, 10, 15, 20, 27 a) and their adjacent dune soils (control CK). The study results indicate that: (1) Increasing paddy cultivation duration significantly reduced surface soil pH and bulk density while increasing electrical conductivity. The content of medium-coarse sand decreased significantly, while that of silt and clay particles increased significantly. Soil organic matter content increased significantly, with a maximum increase of 199.5%; soil total nitrogen content increased significantly, with a maximum increase of 161.1%. (2) With increasing years of rice cultivation, the activities of soil urease, soil catalase, and soil phosphatase significantly increased; soil sucrase activity first rose and then declined. These changes indicate that artificial sandy paddy field technology significantly impacts soil physicochemical properties and enzyme activities, demonstrating that rational human intervention is an effective measure for improving semi-arid sandy soils and ecological management.

Key words: Horqin Sandy Land; artificial sandy paddy technology; soil physicochemical properties; soil enzyme activity; aeolian entisols