

不同覆膜连作年限对玛纳斯县 棉田土壤质量的影响

苟燕如¹,杨京京²,柴强³,汤庆峰⁴,严涵¹,
胡洋¹,邓朋飞¹,孙霞^{1,5},贾宏涛^{1,5}

(1.新疆农业大学资源与环境学院,新疆乌鲁木齐 830052;2.石河子农业科学研究院,新疆石河子 532000;
3.新疆玛纳斯县兰州湾镇人民政府,新疆玛纳斯 832200;
4.北京市科学技术研究院分析测试研究所(北京市理化分析测试中心),北京 100089;
5.新疆土壤与植物生态过程重点实验室,新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:为研究不同覆膜连作年限对玛纳斯县棉田土壤质量的影响,以新疆玛纳斯县覆膜连作0、5、10、20、30 a的棉田为研究对象,分别采集0~10、10~20、20~30 cm 土层土壤,测定其土壤理化性质、土壤酶活性、土壤微生物量碳、氮含量等指标,并对不同覆膜连作年限玛纳斯县棉田的土壤质量进行综合评价。结果表明:(1)随覆膜连作年限的增加,土壤含水率和有机质含量逐渐增加,以覆膜连作30 a时最高,分别为11.52%和21.60 g·kg⁻¹,土壤速效磷呈先升高后降低趋势,在覆膜连作10 a时含量最高(49.60 mg·kg⁻¹),土壤电导率、总盐、速效钾和碱解氮总体呈降低趋势,在覆膜连作年限30 a时含量最低,分别为0.50 mS·cm⁻¹、0.69 g·kg⁻¹、148.28 mg·kg⁻¹和25.27 mg·kg⁻¹;同一覆膜连作年限下,随着土层深度的增加,土壤含水率、电导率和总盐逐渐增加,pH值、有机质、速效磷、速效钾和碱解氮含量逐渐降低。(2)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,在覆膜连作10 a时活性最高,分别为10.57 mg·g⁻¹·d⁻¹、0.86 mg·g⁻¹·d⁻¹、0.40 mg·g⁻¹·d⁻¹,土壤过氧化氢酶活性随不同覆膜连作年限并无显著变化,为1.80~2.20 mL·g⁻¹;在同一覆膜连作年限下,土壤脲酶、碱性磷酸酶活性均表现为表层>深层,且差异显著。随覆膜连作年限的增加,土壤微生物量碳含量呈现先增加后减少的趋势,最高为205.26 mg·kg⁻¹,微生物量氮含量逐渐降低,最低在覆膜连作30 a时为11.40 mg·kg⁻¹,且不同土层土壤微生物量碳、氮表现为表层>深层。(3)土壤速效磷与过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶活性和微生物量碳呈极显著正相关关系,与蔗糖酶活性呈显著正相关关系,表明土壤速效磷是影响土壤酶活性和微生物量碳、氮的主要因素。土壤质量综合评价表明,以覆膜连作10 a的土壤质量最佳,0 a和30 a的土壤质量相对较低。

关键词:覆膜连作年限;土壤理化性质;土壤酶活性;土壤质量

中图分类号:S562;S153;S154.2 **文献标志码:**A

Effects of different coating years on soil quality of cotton field in Manase County

GOU Yanru¹, YANG Jingjing², CHAI Qiang³, TANG Qingfeng⁴, YAN Han¹,
HU Yang¹, DENG Pengfei¹, SUN Xia^{1,5}, JIA Hongtao^{1,5}

(1. School of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;
2. Shihezi Institute of Agricultural Sciences, Shihezi, Xinjiang 532000, China;
3. People's Government of Lanzhou Bay Town, Manas County, Xinjiang, Manas, Xinjiang 832200, China;
4. Institute of Analysis and Testing of Beijing Institute of Science and Technology (Beijing Physical and
Chemical Analysis and Testing Center), Beijing 100089, China;
5. Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Process, Xinjiang, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: The purpose of this study was to examine the effects of different coating years on soil properties and

收稿日期:2021-11-12

修回日期:2022-04-02

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01A88);农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室开放基金项目(XBLZ-202004);新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2021G168)

作者简介:苟燕如(1996-),女,新疆库尔勒人,硕士研究生,研究方向为农田土壤微塑料污染。E-mail: 986941484@qq.com

通信作者:孙霞(1975-),女,江苏建湖人,副教授,主要从事土壤与植物营养方向的研究。E-mail: sunxia1127@163.com

enzyme activity. In April 2021, the cotton fields of 0~10, 10~20 cm and 20~30 cm in Manas County were selected as study sites. The soil physical and chemical properties, soil enzyme activity, soil microbial carbon and nitrogen content were determined, and the soil quality of cotton fields in Manas County with different film mulching years were comprehensively evaluated. The results showed that: (1) With the increase of film coating continuous years, soil water content and organic matter content were gradually increased, reaching the highest levels of 52% and $21.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ with film coating for 30 years. Soil fast-acting phosphorus increased first before decreasing, and the highest content was with film coating for 10 years, reaching $49.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Soil conductivity, total salt, quick-acting potassium, alkaline nitrogen had a decrease trend with film coating for 30 years. They were $0.50 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, $0.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $148.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and $25.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. During the same period of film coating, with the increased depth of the soil layer, soil water content, conductivity, total salt gradually increased, and pH, organic matter, quick phosphorus, quick potassium, alkaline nitrogen gradually decreased. (2) Under the different years of film coating, soil sucrase, urease and alkaline phosphatase decreased with the increase of the film coating years, reaching the highest content with the coating for 10 years with $10.57 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, $0.86 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, and $0.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ respectively. Soil catalase increased significantly with different coating years, ranging from 1.80 to $2.20 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. At the same period of coating years, except that sucrase content was greater than 10~20 cm, the soil enzyme activity was greater than surface soil and significantly different in deep soil. With the increase of the years of film coating, the soil microbial biomass carbon content increased first and then decreased with the highest $205.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the microbial biomass nitrogen content gradually decreased with the lowest $11.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ under the coating for 30 years. The soil microbial biomass carbon and nitrogen performance were higher than the deep layer. (3) Fast-acting phosphorus had a very significant positive correlation with the micro biomass carbon of catalase, urease, alkaline phosphatase, and sucrase, indicating that soil fast-acting phosphorus was the main factor affecting soil enzyme activity and microbial biomass carbon and nitrogen. Comprehensive evaluation of soil quality showed optimal soil quality under 10-year film coating and relatively low soil quality under 0 and 30-year film coating.

Keywords: film coating for continuous years; soil physical and chemical properties; soil enzyme activity; soil quality

地膜覆盖技术因其增温、保墒、抑制杂草、促进植物成熟等显著优点,已成为确保棉花高产稳产的重要手段之一^[1]。早在上世纪80年代,新疆就开始在棉花作物上推行地膜覆盖技术,并取得了巨大成效。截至2019年,新疆当年农田地膜覆盖面积约为354.80万 hm^2 ,而棉田覆膜总面积约为254.05万 hm^2 ,约占新疆当年农田地膜总覆盖面积的71.60%;而新疆当年农田地膜总使用量为约24.27万t,已成为我国地膜覆盖面积最大、使用量最多的省区,是农用地膜的重点市场。

地膜的大量使用导致其残留严重,目前新疆地区单位土地面积平均地膜残留量高达16.88 kg,已经成为我国最大的地膜污染区。由于使用的地膜为普通塑料地膜,在自然条件下无法降解,并且尚未采取有效的回收措施,使得农田中地膜残留量随着覆膜年限的积累逐年增加,对土壤生态环境造成严重威胁^[2],导致土壤结构破坏^[3]、阻碍土壤水

分^[4]、释放有害物质^[5]、抑制土壤微生物的活动^[6]、降低土壤酶活性和生物多样性^[7-8],从而降低了土壤肥力^[9],甚至产生连作障碍。如果没有采取合理的地膜回收措施,将会影响到棉花品质与产量^[10]。

近年来,土壤酶活性成为了土壤质量评价重要的指标之一,在土壤物质循环与能量转化过程中起着至关重要的作用,已受到广泛关注^[11]。随着土壤中地膜残留量的增加,土壤团聚体水稳定性、土壤养分含量、土壤微生物量均表现出下降趋势^[12];残膜长期留在土壤中会降低土壤有机质、全氮、铵态氮、以及速效磷含量,低浓度残膜会提高土壤微生物活性和丰度,高浓度残膜则会显著降低土壤微生物量、微生物群落丰度和土壤酶活性^[9]。残膜会阻隔土壤空气的流通,使 CO_2 含量上升,导致微生物和土壤动物数量减少,破坏土壤生态系统的良性循环^[13]。土壤长期覆膜连作导致棉花质量下降、产量

降低,严重制约着新疆棉花产业的可持续发展。因此,研究不同覆膜连作年限棉田土壤理化性质、土壤酶活性、微生物量碳、氮的变化,进而对土壤质量进行综合评价,有效地指导该区棉花生产,对促进棉田产业具有重要意义。目前许多学者针对土壤酶活性已展开大量研究工作,但对新疆棉区土壤酶活性的变化和土壤质量综合评价研究仍鲜有报道。本研究以玛纳斯县长期覆膜连作棉田土壤为研究对象,通过分析不同覆膜连作年限棉田土壤理化性质、土壤酶活性、微生物量碳、氮含量变化特征,对该地区不同覆膜连作年限棉田的土壤质量进行综合评价,以期为该地区棉田土壤环境质量评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆昌吉州玛纳斯县位于天山北麓、准噶尔盆地南部,地势自东南向西北倾斜,属温带大陆性干旱半干旱气候区(85°40′~86°31′E,43°21′~45°20′N)。冬季严寒、夏季酷热、干燥少雨、日照充足、蒸发量大、降水少,平原区海拔 300~500 m,年均气温 6.6℃,≥10℃积温 3 489.7℃,年降水量 110~200 mm,年蒸发量 1 500~2 000 mm,无霜期 148~187 d,玛纳斯县是新疆优质棉花种植基地之一,主要土壤类型有灌淤土、潮土、灰漠土、风沙土、盐土,主要经济作物为棉花。

1.2 样品采集

2021 年 4 月在玛纳斯县的兰州湾(86.12°E,44.50°N)、北五岔镇(86.31°E,44.52°N)、六户地镇(86.13°E,44.65°N)、乐土驿镇(86.45°E,44.17°N)和包家店镇(86.33°E,44.36°N)等 5 个乡镇采集土壤样品,采样前棉田无翻耕,选取地理位置和海拔相近、土壤质地相似的覆膜连作年限为 0、5、10、20、30 a 的棉田,同一覆膜连作年限棉田选取 10 块样地,共 50 个采样点,采用 S 形采样法收集 0~10、10~20、20~30 cm 土层土壤,清除可见杂物后,利用四分法提取土样约 1 000 g。将一部分新鲜土样装入样品袋中带回实验室,用于测定土壤微生物量碳、氮,其余部分经过风干处理后,用于测定土壤理化性质、酶活性等指标。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤理化性质 采用 pH 仪和电导仪测定土壤 pH 和电导率;采用烘干法测定土壤含水率;采用

质量法测定土壤总盐;采用重铬酸钾-浓硫酸外加热氧化法测定土壤有机质;采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷;采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定土壤速效钾;采用碱解扩散法测定土壤碱解氮。

1.3.2 土壤酶活性 采用酚钠-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性;采用磷酸苯二钠法测定土壤碱性磷酸酶活性;采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶活性;采用高锰酸钾滴定法测定土壤过氧化氢酶活性。

1.3.3 土壤微生物量碳、氮 采用氯仿熏蒸浸提法测定土壤微生物量碳、氮,用容量法测定微生物量碳,用茚三酮比色法微生物量氮。

1.4 土壤质量综合评价

1.4.1 评价指标标准化 土壤质量评价指标是对土壤功能和最终评价结果具有显著影响、借鉴相关研究构建的土壤质量评价指标体系^[14-16]。选取土壤含水率(X1)、pH(X2)、电导率(X3)、总盐(X4)、有机质(X5)、速效磷(X6)、速效钾(X7)、碱解氮(X8)、过氧化氢酶(X9)、蔗糖酶(X10)、脲酶(X11)、碱性磷酸酶(X12)、微生物量碳(X13)、微生物量氮(X14)作为不同覆膜连作年限棉田土壤质量评价的指标体系。由于测定的各评价指标之间具有不同的量纲,且数量级差别较大,因此对各指标进行无量纲处理之后进行因子分析^[17]。

1.4.2 评价指标权重计算 通过主成分分析得到主成分载荷矩阵,公因子方差可反映各评价单项指标对整体方差的贡献程度,该值越大则对整体方差的贡献率越大;权重(式 1)可反映各评价单项指标对土壤管治的影响程度和贡献率^[18]。

$$W_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i \quad (1)$$

式中, W_i 为第*i*个评价指标的权重; C_i 表示第*i*个评价指标的公因子方差; n 表示评价指标总数。

1.4.3 土壤质量综合评分 土壤质量评分可反映出土壤质量的总体情况,采用式(2)进行计算。

$$SQAV = \sum b_i z_i \quad (2)$$

式中,SQAV为土壤质量评分; b_i 为*i*个因子的方差贡献率; Z_i 为因子得分; i 为主成分因子的个数。

1.5 数据分析

使用 Excel 2010 对数据进行统计,并采用 SPSS 25.0 对数据进行单因素方差分(ANOVA)和多重比较(LSD)进行显著性分析。采用 Pearson 检验土壤理化性质和土壤酶活性、微生物量碳、氮间的相关

性。采用 Origin2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 覆膜连作年限对土壤理化性质的影响

由表 1 可以看出,不同覆膜连作年限土壤的理化性质存在显著差异 ($P<0.05$)。随覆膜连作年限的增加,土壤含水率和有机质含量整体呈现增加趋势,土壤含水率在覆膜连作 30 a 20~30 cm 土层时最高(11.52%),在覆膜连作 0 a 0~10 cm 土层时最低(8.65%);有机质含量在覆膜连作 30 a 10~20 cm 土层时最高($21.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),在覆膜连作 0 a 20~30 cm 土层时最低($9.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);pH 值整体呈现先降低后升高趋势,在覆膜连作 0 a 0~10 cm 土层时最高(8.46),比连作 10 a 时增加了 11.02%;电导率和总盐呈现下降趋势,在覆膜连作 0 a 20~30 cm 土层时最高,分别为 $9.72 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $11.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,在覆膜连作 30 a 0~10 cm 土层时最低,分别为 $0.50 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $0.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;碱解氮随覆膜连作年限的增加整体呈现降低趋势,在覆膜连作 0 a 10~20 cm 土层含量最高($38.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),比覆膜连作 30 a 提高了 33.47%;速效磷呈现先升高后降低趋势,在覆膜连作 10 a 0~10 cm 土层时最高($49.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),显著高于其他覆膜连作年限;速效钾呈现波动性下降趋势,在覆膜连作 30 a 20~30 cm 土层时含量最低,显著低于覆膜连作 0 a。

在同一覆膜年限下,随土层深度的增加,土壤含水率、电导率及总盐总体呈现上升趋势,而土壤 pH

值、有机质、速效磷、速效钾、碱解氮含量总体呈下降趋势,且不同土层之间存在显著性差异 ($P<0.05$)。

2.2 覆膜连作年限对土壤酶活性的影响

由图 1 可知,随覆膜连作年限的增加,土壤过氧化氢酶活性无显著变化,且在不同年限中趋于稳定,变化范围为 $1.80 \sim 2.20 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$;土壤蔗糖酶活性在覆膜连作 0 a 0~10 cm 土层时活性最低($3.44 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$),仅为覆膜连作 10 a 20~30 cm 土层的 67.46%。土壤脲酶和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,在覆膜连作 0 a 20~30 cm 土层时活性最低,分别为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.16 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,显著低于覆膜连作 30 a,分别降低了 76.74%和 65.21%;在覆膜连作 10 a 0~10 cm 土层时活性最高,分别为 $0.86 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

同一覆膜连作年限下,随土层深度的增加,过氧化氢酶活性变化趋势不显著,土壤蔗糖酶在 10~20 cm 土层时活性显著高于其他土层,土壤脲酶、碱性磷酸酶活性整体呈现下降趋势,在 20~30 cm 土层时活性最低。

2.3 覆膜连作年限对土壤微生物量碳、氮的影响

不同覆膜连作年限棉田土壤微生物量碳、氮含量变化如图 2 所示。随覆膜连作年限的增加,0~10 cm 土层土壤微生物量碳含量呈现先增加后减少趋势,且在覆膜连作 20 a 和 0 a 时含量分别为最高($205.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和最低($122.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),与覆膜连作 10 a 的土壤微生物量碳差异不显著,土壤微

表 1 不同覆膜连作下棉田土壤基础理化性质变化特征

Table 1 Characteristics of soil physical and chemical properties in cotton fields of different film mulching

土层 Soil depth /cm	年限 Year /a	含水率 Moisture content/%	pH	电导率 Conductivity /($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	总盐 Total salt /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic matter /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Available N /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0~10	0	8.65±1.06b	8.46±0.18a	7.68±0.68a	8.89±0.74a	10.92±1.63d	33.69±3.35c	252.94±14.57a	36.59±3.76a
	5	9.34±1.26ab	7.87±0.42b	1.58±0.06b	1.68±0.61b	12.13±1.40cd	37.24±1.48b	164.75±15.81c	34.44±1.85a
	10	8.78±1.44b	7.75±0.35b	1.42±0.35b	1.60±0.69b	13.37±1.00c	49.60±1.74a	180.27±13.98b	31.40±2.10b
	20	9.26±1.06ab	7.77±0.29b	1.38±0.20b	1.25±0.28b	17.31±1.47b	35.32±4.91bc	179.19±11.84b	30.24±4.62b
	30	10.27±0.89a	7.87±0.31b	0.50±0.35c	0.69±0.10c	20.03±1.44a	36.83±1.94b	168.40±14.95bc	30.74±1.55b
10~20	0	9.07±1.27b	8.23±0.50a	9.45±0.58a	10.60±1.14a	11.90±1.81cd	27.09±4.17d	248.68±14.45a	38.88±4.53a
	5	10.19±0.91a	7.86±0.28b	1.73±0.08b	2.00±0.40b	11.16±1.07d	33.65±1.82c	175.86±13.42b	30.28±0.87b
	10	10.41±1.14a	7.67±0.31b	1.58±0.37b	1.65±0.93b	12.96±1.68c	46.12±1.89a	168.48±11.10bc	28.94±2.33b
	20	9.79±1.19ab	7.75±0.27b	1.61±0.33b	1.46±0.68bc	15.19±1.72b	41.61±3.15b	170.00±14.25bc	25.40±1.68c
	30	10.68±0.94a	7.84±0.33b	0.53±23c	0.91±0.52c	21.60±1.02a	34.22±1.74c	159.39±11.44c	29.13±1.52b
20~30	0	10.95±1.37a	8.13±0.41a	9.72±0.63a	11.82±1.00a	9.95±1.59c	31.01±2.70c	232.07±13.6a	30.74±1.49a
	5	10.71±1.11a	7.81±0.25b	1.77±0.08b	2.12±0.35b	10.07±1.11c	29.53±0.98c	179.39±7.16b	27.70±1.60b
	10	11.28±1.11a	7.62±0.37b	1.74±0.14b	1.92±0.53b	11.23±1.83c	46.12±1.81a	157.96±10.82c	26.83±2.81bc
	20	10.84±1.30a	7.69±0.25b	1.92±0.37b	1.79±0.43bc	13.52±1.79b	36.86±3.64b	158.69±4.65c	27.00±2.22bc
	30	11.52±1.20a	7.75±0.29b	0.82±21c	1.33±0.47c	17.16±1.19a	31.80±1.78c	148.28±13.37c	25.27±1.89c

注:同列不同字母表示相同土层不同年限间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences between different treatments in the same soil layer ($P<0.05$).

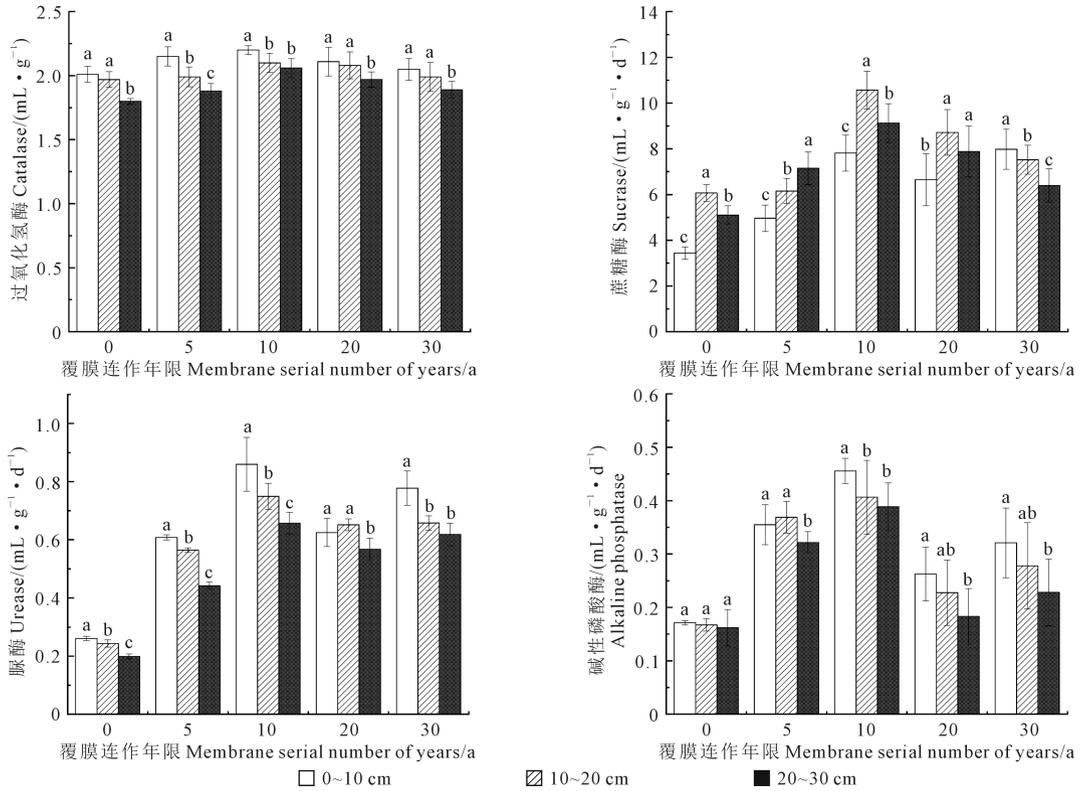
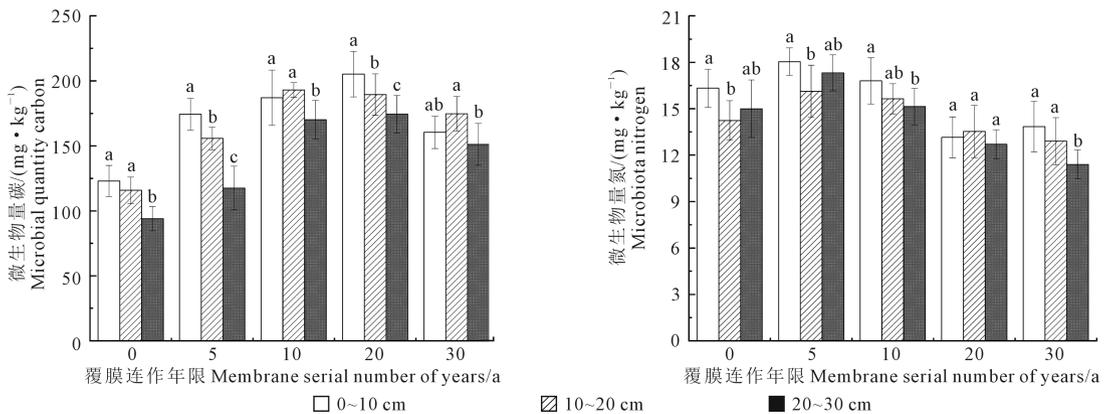


图 1 不同覆膜连作年限 0~30 cm 土层土壤酶活性的变化

Fig.1 Changes of soil enzyme activity in 0~30 cm depth of different mulching years



注:图 1 和图 2 中小写字母表示相同年限不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Lower case letters in figures 1 and 2 indicate significant differences between soil layers of the same age ($P < 0.05$).

图 2 不同覆膜连作年限 0~30 cm 土层土壤微生物量碳、氮含量

Fig.2 Carbon and nitrogen content of soil microorganism in 0~30 cm depth of different years mulching

生物量氮随覆膜连作年限的增加逐渐降低,在覆膜连作 5 a 时含量最高;10~20 cm 土层土壤微生物量碳在覆膜连作 10 a 时含量最高 ($193.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),高于覆膜连作 0 a,土壤微生物量氮在各覆膜连作年限之间差异不显著,其含量为 $16.13 \sim 12.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;20~30 cm 土层土壤微生物量碳在覆膜连作 20 a 时最高 ($174.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),在 0 a 时含量最低 ($93.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),覆膜连作 5 a 处理下土壤微生物量氮含量比覆膜连作 30 a 处理提高了 54.46%。

同一覆膜连作年限下,随土层深度的增加,土壤微生物量碳、氮含量整体呈现下降趋势,在 20~30 cm 土层时含量最低。

2.4 土壤理化性质和土壤酶活性、微生物量碳、氮的相关性分析

由表 2 可以看出,过氧化氢酶活性与有机质、速效磷和碱解氮均呈正相关,与速效磷呈极显著相关关系 ($P < 0.01$),与土壤含水率呈显著相关关系 ($P <$

0.05);蔗糖酶活性与电导率、总盐、速效钾和碱解氮均呈显著的负相关关系($P<0.05$),与速效磷呈显著正相关关系($P<0.05$);脲酶活性与pH、电导率、总盐和速效钾均呈极显著的负相关关系,与速效磷呈极显著正相关关系($P<0.01$);碱性磷酸酶与速效磷呈极显著正相关关系($P<0.01$),与pH、电导率、总

盐和速效钾呈显著负相关关系($P<0.05$)。土壤微生物量碳与速效磷呈极显著正相关关系,与pH、电导率、总盐、速效钾呈极显著负相关关系($P<0.01$);微生物量氮与有机质呈极显著负相关关系($P<0.01$)。综上所述,速效磷是影响土壤酶活性、微生物量碳、氮的主要因素。

表2 土壤理化性质和土壤酶活性、微生物量碳、氮的相关性分析

Table 2 Analysis of soil physical and chemical properties and soil enzyme activity, microbial biomass, carbon and nitrogen correlation

指标 Index	含水率 Moisture content	pH	电导率 Conductivity	总盐 Total salt	有机质 Organic matter	速效磷 Available P	速效钾 Available K	碱解氮 Available N
过氧化氢酶 Catalase	-0.573 *	-0.329	-0.456	-0.494	0.202	0.758 **	-0.288	0.135
蔗糖酶 Sucrase	0.373	-0.786 **	-0.568 *	-0.584 *	0.270	0.636 *	-0.612 *	-0.606 *
脲酶 Urease	0.089	-0.798 **	-0.887 **	-0.889 **	0.533 *	0.750 **	-0.815 **	-0.492
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	-0.020	-0.585 *	-0.622 *	-0.617 *	-0.009	0.688 **	-0.527 *	-0.189
微生物量碳 Microbial quantity carbon	-0.112	-0.715 **	-0.763 **	-0.792 **	0.488	0.711 **	-0.690 **	-0.385
微生物量氮 Microbiota nitrogen	-0.413	0.208	0.140	0.136	-0.663 **	0.193	0.254	0.419

注: ** 表示极显著相关($P<0.01$), * 表示显著相关($P<0.05$)。

Note: ** represents a very significant correlation ($P<0.01$), * represents a significant correlation ($P<0.05$).

2.5 覆膜连作年限下棉田土壤质量综合分析

在14个评价指标中,选取3个因子作为主要因子,累计贡献值达到87.420%,可以代表原来14个评价指标(表3)。由表4可知,与第1主成分相关性较高的指标有X9、X11、X13,即土壤过氧化氢酶、脲酶、微生物量碳;第2主成分与X1、X2、X8相关性较高,即土壤含水率、pH、碱解氮;第3主成分与X5、X14相关性较高,即有机质、土壤微生物量氮。

通过计算得出各处理的因子得分及综合得分情况(表5),由各因子得分和方差贡献值加权得到土壤质量综合得分,不同覆膜连作年限下的土壤质量综合得分整体表现为10 a>5 a>20 a>30 a>0 a。

3 讨论

3.1 覆膜连作年限对土壤理化性质的影响

棉花是新疆的主要经济作物,且棉花地膜覆盖率已达到100%,棉田覆膜占新疆地膜使用量的60%左右。长期覆膜连作会改变棉田土壤理化性质、导致养分严重失衡、毒害物质积累等土壤环境问题^[19]。本研究发现在不同覆膜连作年限下,随覆膜连作年限的增加,土壤速效磷呈现先升高后降低趋势,电导率、总盐、速效钾、碱解氮总体逐渐减小,这与前人研究结果一致^[20-21],表明覆膜连作年限的增加会降低土壤养分积累,且覆膜年限越长残膜积累量越多,这说明地膜残留对土壤养分含量有显著差异。pH值整体呈现先降低后升高的趋势,残留地

表3 因子特征值及方差贡献率

Table 3 Factor eigenvalue and variance contribution rate

因子 Component	特征值 Eigen value	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计方差贡献率 Cumulative contribution/%
1	7.749	55.351	55.351
2	2.933	20.951	76.302
3	1.557	11.118	87.420

表4 旋转后土壤生物性状因子载荷矩阵、公因子方差及权重

Table 4 Soil biological trait factor load matrix, public factor variance and weights after rotation

指标 Index	第1主成分 Principal component 1	第2主成分 Principal component 2	第3主成分 Principal component 3	公因子方差 Communality	权重 Weight
X1	-0.207	-0.937	-0.092	0.929	0.076
X2	-0.678	0.683	0.095	0.934	0.076
X3	-0.773	0.464	0.259	0.880	0.072
X4	-0.794	0.436	0.258	0.886	0.072
X5	0.317	-0.070	-0.875	0.870	0.071
X6	0.835	-0.044	0.205	0.741	0.061
X7	-0.646	0.665	0.249	0.921	0.075
X8	-0.261	0.878	0.197	0.877	0.072
X9	0.887	0.424	0.010	0.967	0.079
X10	0.597	-0.522	-0.055	0.632	0.052
X11	0.920	-0.261	-0.205	0.957	0.078
X12	0.807	-0.158	0.429	0.861	0.070
X13	0.889	-0.059	-0.328	0.901	0.074
X14	0.172	0.312	0.869	0.882	0.072

注:X1:土壤含水率;X2:pH;X3:电导率;X4:总盐;X5:有机质;X6:速效磷;X7:速效钾;X8:碱解氮;X9:过氧化氢酶;X10:蔗糖酶;X11:脲酶;X12:碱性磷酸酶;X13:微生物量碳;X14:微生物量氮。

Note: X1: Soil moisture content; X2: pH; X3: Conductivity; X4: Total salt; X5: Organic matter; X6: Available P; X7: Available K; X8: Available N; X9: Catalase; X10: Sucrase; X11: Urease; X12: Alkaline phosphatase; X13: Microbial quantity carbon; X14: Microbiota nitrogen.

表 5 不同覆膜连作年限棉田土壤质量评价

Table 5 Results of soil quality of different compound film years

覆膜连作年限 Membrane serial number of years	因子得分 Factor score			综合得分 Comprehensive score	排名 Ranking
	F1	F2	F3	F	
0	-1.486	1.024	0.329	-0.423	5
5	0.068	-0.198	0.976	0.150	2
10	1.127	-0.228	0.875	0.683	1
20	0.295	-0.104	-0.878	-0.027	3
30	-0.005	-0.494	-1.303	-0.377	4

注: F1 为第 1 主成分的因子得分, F2 为第 2 主成分的因子得分, F3 为第 3 主成分的因子得分。

Note: F1 is the factor score for the first component, F2 is that for the second component, and F3 is the factor score for the third principal component.

膜可能会使土壤盐分、pH 值升高。随着土层深度的增加, 土壤养分含量逐渐降低, 刘瑜等^[22]研究表明棉花连作表层土壤速效磷和速效钾含量均显著高于深层, 这是由于棉田多年采用覆膜滴灌施肥而造成土壤养分表聚的结果, 且表层残膜量高于深层, 这说明地膜残留对表层土壤养分含量无显著影响。有机质含量随土层深度增加逐渐降低, 这可能是由于枯枝落叶和棉花根系在表层分解, 导致有机质在地表富集; 同时, 有机质含量逐年增加, 这是由于长年秸秆还田所致。

3.2 覆膜连作年限对土壤生物性质的影响

土壤酶活性是指具有催化有机质及其他有机化合物分解和转化能力的指标, 可有效反应土壤质量和健康状况^[23]。本研究中, 土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性总体呈现先增加后降低的趋势, 土壤过氧化氢酶活性随不同覆膜连作年限并无显著变化, 前人研究发现棉田连作对过氧化氢酶的影响不明显, 与荒地相比, 随覆膜连作年限的增加, 土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性均呈现出先增加后降低的趋势^[24]。随覆膜连作年限的增加, 土壤微生物量碳含量呈现先增加后减少的趋势, 微生物量氮含量逐渐降低, 该结果与郭新送等^[25]研究相似, 这是由于地膜在土壤中释放有毒有害物质, 破坏土壤结构, 阻碍了土壤空气的循环和交换, 致使土壤中 CO₂ 含量过高, 从而降低土壤酶活性和微生物量。pH 值、电导率、总盐和速效钾对土壤酶活性表现为负效应, 有机质和速效磷对土壤活性表现为正效应, 这与贡璐等^[26]研究基本一致。土壤速效磷与过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶活性和微生物量碳呈现极显著相关, 与蔗糖酶呈显著相关, 而土壤速效

磷是植物所需的营养元素之一, 它的主要作用是促进作物体内营养物质的运输、转化和积累, 提高农作物抗寒和抗病性, 能直接供作物吸收利用, 是土壤养分供应能力和肥力的重要指标之一^[27], 能改善土壤的物理性质, 促进微生物和土壤生物的活动, 是影响土壤酶活性、微生物量碳、氮的主要因素。

3.3 覆膜连作年限棉田土壤质量综合评价

土壤质量指标是表示从土壤生产潜力和环境管理的角度监测和评价土壤健康状况的性状、功能或条件^[28]。土壤质量的高低受自然和人为条件因素影响, 且因地区和土壤类型而异。土壤理化性质、酶活性、微生物量均随覆膜连作年限发生变化, 进而影响土壤健康。基于因子分析法得出的不同覆膜连作年限棉田土壤质量评分最高的是覆膜连作 10 a, 其次是 5 a, 0 a 和 30 a 相对较低, 覆膜连作 5 a 和 10 a 的棉田地膜残留量较少, 且覆膜可以提高土壤养分含量, 有利于土壤养分积累, 改善土壤环境, 因此土壤质量状况较好; 而覆膜连作 0 a 和 30 a 棉田土壤质量相对较低, 说明覆膜连作时间过长或不种作物均不利于棉花生长, 这是因为新疆土壤本身盐碱含量较高, 土壤水分和土壤养分等含量较低, 加之土地没有得到有效管理, 降雨作用易导致土壤板结, 不利于作物生长^[29], 而覆膜连作 30 a 的土壤质量较低, 这是由于土壤中地膜残留逐年积累, 甚至对重金属离子和有机污染均产生吸附作用, 导致土壤环境恶化, 危害土壤健康^[30]。周斌等^[31]研究表明 13 a 耕作农田土壤质量提高效果明显, 且棉田土壤质量状况最佳。贡璐等^[32]发现棉田的土壤质量随覆膜连作年限呈先上升后下降的趋势, 连作 8、12 a 棉田土壤质量相对较高, 连作 20、30 a 土壤质量有退化趋势, 说明在 5~15 a 之间土壤质量较高, 在 20~30 a 之间土壤质量较差, 这与本文研究结果一致。

4 结 论

1) 随覆膜连作年限的增加, 有机质含量逐渐增加, 土壤速效磷呈现先升高后降低趋势, pH、电导率、总盐、速效钾、碱解氮呈现降低趋势; 土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性随着覆膜连作年限的增加呈现先升高后降低的趋势, 土壤过氧化氢酶含量并无显著变化; 微生物量碳呈现先增加后减少趋势, 微生物量氮含量逐年降低; 随着土层深度的增加, 土壤养分、土壤酶活性、微生物量碳、氮含量逐渐降低。

2) 土壤理化性质与土壤酶活性、微生物量碳、

氮之间存在一定相关性,速效磷与过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶活性和微生物量碳呈现极显著相关,与蔗糖酶活性呈显著相关,表明土壤速效磷是影响土壤酶活性和微生物量碳、氮的主要因素。

3) 土壤质量综合得分表现为覆膜连作年限 10 a > 5 a > 20 a > 30 a > 0 a, 覆膜连作 10 a 是土壤养分最佳的年限,有利于提高土壤质量和增加棉花产量。

参 考 文 献:

- [1] 严昌荣,梅旭荣,何文清,等.农用地膜残留污染的现状与防治[J].农业工程学报,2006,22(11):269-272.
YAN C R, MEI X R, HE W Q, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(11): 269-272.
- [2] 董合干,刘彤,李勇冠,等.新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(8):91-99.
DONG H G, LIU T, LI Y G, et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(8): 91-99.
- [3] 王志超,李仙岳,史海滨,等.农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响[J].农业机械学报,2015,46(5):101-106,140.
WANG Z C, LI X Y, SHI H B, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 101-106, 140.
- [4] 贾浩,王振华,张金珠,等.不同残膜量对土壤水分运移的影响及模拟[J].干旱地区农业研究,2021,39(1):49-56.
JIA H, WANG Z H, ZHANG J Z, et al. Effects of different residual film quantity on soil moisture movement and simulation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1): 49-56.
- [5] 彭伟,赵玉杰,王璐,等.南疆棉花产区土壤和农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分析和评价[J].农业环境科学学报,2018,37(12):2678-2686.
PENG Y, ZHAO Y J, WANG L, et al. Contamination and risk assessment of phthalates in soils and agricultural products after cotton cultivation in southern Xinjiang, Northwest China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(12): 2678-2686.
- [6] 赵雪.地膜残留累积对土壤微生物的影响[J].工业安全与环保,2018,44(12):94-96.
ZHAO X. Effects of accumulation of plastic film on soil microbial activity[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018, 44(12): 94-96.
- [7] WANG X H, YUAN X, HOU Z G, et al. Effect of di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) on microbial biomass C and enzymatic activities in soil[J]. European Journal of Soil Biology, 2009, 45(4): 370-376.
- [8] LIU E K, HE W Q, YAN C R. 'White revolution' to 'white pollution'-agricultural plastic film mulch in China[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(9): 091001.
- [9] 张丹,刘宏斌,马忠明,等.残膜对农田土壤养分含量及微生物特征的影响[J].中国农业科学,2017,50(2):310-319.
ZHANG D, LIU H B, MA Z M, et al. Effect of residual plastic film on soil nutrient contents and microbial characteristics in the farmland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(2): 310-319.
- [10] 于立红,于立河,王鹏.地膜中邻苯二甲酸酯类化合物及重金属对

- 土壤-大豆的污染[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):43-47,60.
YU L H, YU L H, WANG P. Pollution by phthalic acid esters and heavy metals in plastic film in soil-soybean system[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 43-47, 60.
- [11] 王理德,王方琳,郭春秀,等.土壤酶学研究进展[J].土壤,2016,48(1):12-21.
WANG L D, WANG F L, GUO C X, et al. Review: progress of soil enzymology[J]. Soils, 2016, 48(1): 12-21.
- [12] 尉海东,伦志磊,郭峰.残留农膜对土壤性状的影响[J].生态环境,2008,17(5):1853-1856.
WEI H D, LUN Z L, GUO F. Effects of mulch film residues oil soil properties[J]. Ecology and Environment Sciences, 2008, 17(5): 1853-1856.
- [13] MUMTAZ T, KHAN M R, HASSAN M A. Study of environmental biodegradation of LDPE films in soil using optical and scanning electron microscopy[J]. Micron, 2010, 41(5): 430-438.
- [14] 余坤,李国建,李百凤,等.不同秸秆还田方式对土壤质量改良效应的综合评价[J].干旱地区农业研究,2020,38(3):213-221.
YU K, LI G J, LI B F, et al. Comprehensive evaluation of soil quality under different straw incorporation approaches [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 213-221.
- [15] MULAT Y, KIBRET K, BEDADI B, et al. Soil quality evaluation under different land use types in Kersa sub-watershed, eastern Ethiopia[J]. Environmental Systems Research, 2021, 10(1): 19.
- [16] 吕真真,刘广明,杨劲松,等.黄河三角洲滨海盐渍土区土壤质量综合评价[J].干旱地区农业研究,2015,33(6):93-97.
LYU Z Z, LIU G M, YANG J S, et al. Synthetic evaluation of soil quality of the coastal saline soil in Yellow River Delta Area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6): 93-97.
- [17] 刘森,蔡春菊,范少辉,等.不同恢复年限对川南丘陵区竹林地土壤质量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(1):63-71.
LIU M, CAI C J, FAN S H, et al. Effects of different restoration years on soil quality of Bambusa rigida plantations in southern Sichuan[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2022, 50(1): 63-71.
- [18] 梅闯,闫鹏,冯贝贝,等.种植年限对新疆盐碱土苹果园土壤质量及果实品质的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(2):10-14,36.
MEI C, YAN P, FENG B B, et al. Effects of planting years on soil and fruit quality in saline-alkali soil in Xinjiang apple orchard[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(2): 10-14, 36.
- [19] 叶祖鹏,白旭明,陈波浪.不同连作年限对棉花根系形态和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(2):135-141.
YE Z P, BAI X M, CHEN B L. Effects of different years of continuous cropping on cotton root morphology and yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 135-141.
- [20] 易鸳鸯,谢芳,胡潇涵,等.新疆五家渠地区不同覆膜年限棉田土壤中邻苯二甲酸酯残留特征[J].新疆农业大学学报,2020,43(3):221-227.
YI Y Y, XIE F, HU X H, et al. Residual characteristics of phthalate acid esters (PAEs) in cotton fields with different mulching film years in Wujiaqu area, Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2020, 43(3): 221-227.
- [21] 张欣.不同覆膜年限烟田土壤中 PAEs 积累及其对植物生长的影响[D].南京:南京农业大学,2019.
ZHANG X. Accumulation of PAEs in tobacco soils with different mulching years and its impact on plant growth[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.

- [22] 刘瑜,梁永超,褚贵新,等.长期棉花连作对北疆棉区土壤生物活性与酶学性状的影响[J].生态环境学报,2010,19(7):1586-1592.
LIU Y, LIANG Y C, CHU G X, et al. Effects of long-term cotton monocropping on soil biological characteristics and enzyme activities in northern Xinjiang[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(7): 1586-1592.
- [23] 王丽红,郭晓冬,谭雪莲,等.不同轮作方式对马铃薯土壤酶活性及微生物数量的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(5):109-113.
WANG L H, GUO X D, TAN X L, et al. Effects of different crop rotations on enzyme activities and microbial quantities in potato soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(5): 109-113.
- [24] 朱新萍,梁智,王丽,等.连作棉田土壤酶活性特征及其与土壤养分相关性研究[J].新疆农业大学学报,2009,32(4):13-16.
ZHU X P, LIANG Z, WANG L, et al. Study on correlation between soil enzymatic activity and soil fertility in continuous cropping cotton field[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2009, 32(4): 13-16.
- [25] 郭新送,于晓东,张晶,等.不同种植年限桃树根区土壤肥力变异特征[J].中国农学通报,2021,37(17):65-71.
GUO X S, YU X D, ZHANG J, et al. Temporal variation of rootzone soil fertility in different planting years of peach orchards[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(17): 65-71.
- [26] 贡璐,冉启洋,韩丽.塔里木河上游典型绿洲连作棉田土壤酶活性与其理化性质的相关性分析[J].水土保持通报,2012,32(4):36-42.
GONG L, RAN Q Y, HAN L. Enzymatic activities and related physicochemical properties in soils of continuous cropping cotton fields within a typical oasis in upper reaches of Tarim River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(4): 36-42.
- [27] 陈波浪,吴海华,罗佳,等.土壤速效磷浓度对立架甜瓜生物量和磷素累积特征的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):153-158.
CHEN B L, WU H H, LUO J, et al. Effects of soil Olsen P concentration on biomass and phosphorus accumulation characteristics of trellis-cultivated melon[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 153-158.
- [28] 张心昱,陈利顶.土壤质量评价指标体系与评价方法研究进展与展望[J].水土保持学报,2006,13(3):30-34.
ZHANG X Y, CHEN L D. The progress and prospect of soil quality indicators and evaluation methods[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(3): 30-34.
- [29] 姜艳,刘东阳,李健梅,等.玛河流域不同连作年限棉田土壤质量分析及综合评价[J].干旱地区农业研究,2021,39(4):186-193.
JIANG Y, LIU D Y, LI J M, et al. Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in Manas River Basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 186-193.
- [30] 丁凡,李诗彤,王展,等.塑料和可降解地膜的残留与降解及对土壤健康的影响:进展与思考[J].湖南生态科学学报,2021,8(3):83-89.
DING F, LI S T, WANG Z, et al. Residue and degradation of plastic and degradable mulch in cropland and their effects on soil health: progress and perspective[J]. Journal of Human Ecological Science, 2021, 8(3): 83-89.
- [31] 周斌,乔木,王周琼.长期定位施肥对灰漠土农田土壤质量的影响[J].中国生态农业学报,2007,15(2):33-36.
ZHOU B, QIAO M, WANG Z Q. Effects of a long-term located fertilization on soil quality of grey desert soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(2): 33-36.
- [32] 贡璐,张海峰,吕光辉,等.塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J].生态学报,2011,31(14):4136-4143.
GONG L, ZHANG H F, LV G H, et al. soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 4136-4143.

(上接第 191 页)

- [27] 王文华,周鑫斌,周永祥,等.不同磷效率油菜根际土壤磷活化机理研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1379-1387.
WANG W H, ZHOU X B, ZHOU Y X, et al. The mechanism of rhizosphere phosphorus activation of two rape genotypes (*Brassica napus* L.) with different P efficiencies[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(6): 1379-1387.
- [28] 顾焯明,李银水,谢立华,等.浅析油菜作为绿肥的应用优势[J].中国土壤与肥料,2019,(1):180-183.
GU C M, LI Y S, XIE L H, et al. Analysis on application advantages of rapeseed as green manure[J]. Soil and Fertilizers Sciences in China, 2019,(1): 180-183.
- [29] 高菊生,徐明岗,董春华,等.长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J].作物学报,2013,39(2):343-349.
GAO J S, XU M G, DONG C H, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 343-349.
- [30] 吴林坤,林向民,林文雄.根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J].植物生态学报,2014,38(3):298-310.
WU L K, LIN X M, LIN W X. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(3): 298-310.
- [31] 杨铁钊,杨志晓,林娟,等.不同烤烟基因型根际钾营养和根系特性研究[J].土壤学报,2009,46(4):646-651.
YANG T Z, YANG Z X, LIN J, et al. K nutrition in rhizosphere and characteristic of roots of flue-cured tobacco different in genotype[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(4): 646-651.
- [32] 杨铁钊,彭玉富.富钾基因型烤烟钾积累特征研究[J].植物营养与肥料学报,2006,12(5):750-753.
YANG T Z, PENG Y F. Potassium accumulation characteristics of rich-potassium genotypic flue-cured tobacco[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2006, 12(5): 750-753.
- [33] 崔建宇,王敬国,张福锁.肥田萝卜,油菜对金云母中矿物钾的活化与利用[J].植物营养与肥料学报,1999,5(4):328-334.
CUI J Y, WANG J G, ZHANG F S. Mobilization and utilization of structural potassium in phlogopite as affected by plant species[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 1999, 5(4): 328-334.
- [34] HINSINGER P, ELSASS F, JAILLARD B, et al. Root-induced irreversible transformation of a trioctahedral mica in the rhizosphere of rape[J]. Journal of Soil Science, 1993, 44(3): 535-545.