

滴灌条件下盐碱地垦殖对土壤盐度和肥力影响的长期观测*

霍伟歌¹, 彭懿¹, 张少民², 刘盛林³, 白灯沙·买买提艾力², 冯固^{1†}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 新疆农业科学院核技术生物技术研究所, 乌鲁木齐 830091; 3. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100)

摘要: 膜下滴灌种植模式下内陆干旱区盐碱地垦殖后理化性状的演变过程, 尤其是土壤盐分和有效养分含量的变化规律一直受到广泛关注。以新疆硫酸盐灰漠土为对象, 采用长期定位观测的方法开展研究。在新疆玛纳斯县选择了始于 1996 年的不同年份开荒样地, 于 2010—2020 年间开展了四次定位调查, 定点监测了垦荒后膜下滴灌条件下土壤盐度和肥力性状指标的动态变化, 比较了不同种植年限样地的差别。主要结果如下: 荒地开垦植棉后耕层 (0~20 cm) 土壤盐分显著降低, 垦种 6~10 年后达到轻度盐渍化水平, 各地块的盐分含量平均下降至 $3.71 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 年均下降速率为 $1.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 随着开垦年限的增加 (垦种 11~25 年), 耕层土壤盐分基本维持在 $2.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 达到非盐化水平。不同开垦年限地块的土壤 pH 在垦种后呈现显著下降的趋势, 随着开垦年限增加 (垦种 11~25 年), 土壤 pH 维持在 8.2~8.5 之间。土壤有效磷含量随垦种年限延长而显著增加, 磷素肥力明显提升, 垦种 11~25 年后平均有效磷水平在 $13\sim 20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。不同垦种年份土壤有效磷变化速率不同, 近年开垦地块土壤有效磷上升幅度较大。土壤有机质含量在垦种 6~10 年开始显著增加; 土壤速效钾含量在垦种 1~5 年显著降低, 垦种 6~10 年开始缓慢增加, 垦种 11~16 年能够增加至初始水平, 然后维持稳定。土壤无机氮含量在垦种 6~15 年处于显著增加阶段, 垦种 16~25 年基本维持稳定。综上, 盐化灰漠土荒地开垦后采用膜下滴灌模式种植棉花 25 年能有效降低土壤盐度并将耕层盐分含量控制在轻度盐渍化水平以下, 荒地开垦后需要 6~10 年时间可变为良田。本研究可为内陆干旱区盐碱地节水种植对土壤剖面盐分含量控制和肥力培育的长效机制提供依据。

关键词: 盐碱地; 灰漠土; 种植年限; 滴灌; 土壤肥力; 盐度

中图分类号: S156.4⁺¹ 文献标志码: A

Long-term Observation of Effects on Soil Salinity and Fertility in Saline-alkali Land Reclamation Under Drip Irrigation

HUI Weige¹, PENG Yi¹, ZHANG Shaomin², LIU Shenglin³, BAIDENGLSHA Maimaiti², FENG Gu^{1†}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Institute of Nuclear Technology and Biotechnology, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: 【Objective】 The submembrane drip irrigation planting mode has been a major factor in the evolution of physicochemical traits after the reclamation of saline-alkali land in inland arid areas, especially the changes in soil salinity and available nutrient content.

*国家重点研发计划项目课题 (2022YFD1900102) 和水利部重大科技项目课题 (SKS—2022054) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFD1900102) and the Major Scientific and Technological Projects of the Ministry of Water Resources of China (No. SKS—2022054)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: fenggu@cau.edu.cn

作者简介: 霍伟歌 (1989—), 女, 河南许昌人, 博士, 研究方向为作物磷高效利用。E-mail: 18813119026@163.com

收到日期: 2023-09-08; 收到修改稿日期: 2023-12-18; 网络首发日期 (www.cnki.net):

【Method】 In this study, the gray desert soil of Xinjiang was studied by continuous localization survey and observation of the sample plot. The sample plots of Manas in Xinjiang were selected for land reclamation in different years beginning from 1996, and four surveys were carried out from 2010 to 2020. The dynamic changes of soil salinity and fertility traits of gray desert soil under the condition of submembrane drip irrigation cotton after reclamation were monitored at fixed points, and the differences of several plots after different planting years were compared. **【Result】** The main resulted suggest that the soil salinity in the topsoil (0-20 cm) was significantly reduced after the reclamation from uncultivated land to farmland, and the average salinity of various plots decreased to $3.71 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ after 6-10 years of reclamation. The average annual decline rate was $1.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, reaching the level of mild salinization, then with the continued reclamation (11-25 years), the soil salinity was maintained between $2.06\text{-}2.11 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, and reaching the non-salinization level. The soil pH in different reclamation years showed a significant downward trend after reclamation. With continued reclamation (11-25 years), the average soil pH remained between 8.2 and 8.5, which was slightly alkaline. With increasing years of reclamation, the soil available phosphorus (P) increased significantly, after 11-25 years of reclamation and planting, the soil average available P level remained between 13.33, and $19.97 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. This indicated that the variation of soil fertility was different with the different reclamation years. The soil organic matter increased significantly after 6-10 years of reclamation while the soil available potassium slowly decreased after 1-5 years of reclamation but slightly increased after 6-10 years. Also, available potassium increased to the original level after 11-16 years and then remained stable. The content of soil inorganic nitrogen increased significantly after 6-15 years of reclamation and remained stable after 16-25 years. **【Conclusion】** This study showed that the process of reclamation and utilization of uncultivated land into farmland had a significant effect on the improvement and cultivation of soil P fertility. The uncultivated land reclamation and utilization effectively reduced soil salinity and pH, and it took 6-10 years to change the good land after uncultivated land reclamation. This study provides a theoretical basis for the control of salt content and the improvement of fertilization and farmland productivity during the reclamation process of inland saline-alkali uncultivated land.

Key words: Saline-alkali land; Gray desert soil; Planting year; Drip irrigation; Soil fertility; Salinity

伴随着人口增加和耕地的减少, 为了满足经济社会发展需要, 盐碱荒地开垦为耕地是保持耕地资源动态平衡的必然需求。在中国, 从热带到寒温带、滨海到内陆、湿润地区到极端干旱的荒漠地区, 均有大量盐渍土分布。我国各类盐碱地有 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国可利用土地面积的 4.88%, 是我国重要的后备耕地资源^[1]。以新疆为代表的干旱区耕地面积飞速增长, 绿洲不断向外围荒漠区域扩张, 大面积的荒漠土壤、盐碱地转变为农田^[2]。根据传统的盐碱土改良理论与实践经验, 将盐碱荒地改造为高产农田需要有配套的灌排工程和每年大量的淡水消耗作为支撑。在目前淡水资源日益缺乏的大背景下, 节水灌溉控盐技术逐渐被接受, 并获得大面积推广应用^[3], 也导致原有的灌排渠系退化甚至消失。然而, 每年灌溉水带入农田的盐分高达 $0.63\text{-}1.84 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 长期灌溉导致农田土壤盐渍化有加剧的风险^[4-5]。盐分在农田土壤剖面中的内循环过程和盐分累积对耕地质量和产能提升的长期效应, 不仅是对传统理论提出的新挑战, 也是直接关乎绿洲农业可持续性的重大生态环境问题。

土壤盐度是衡量干旱区耕地质量的关键指标, 可反映耕地土壤培肥的长期效果。前人针对盐碱荒地开垦为耕地后土壤盐度和肥力状况的变化开展了诸多研究。多数研究发现, 随着开垦年限的增加土壤剖面盐分均呈现相对减少的趋势^[6-7], 表层土壤总盐含量在开垦种植 6~8 年后基本维持在非盐化-轻度盐渍化水平^[6]。张少民等^[8]通过对北疆不同开垦年限地块的研究发现, 土壤盐分在土地开垦利用前 4 年快速下降, 5~15 年后耕层土壤盐分维持稳定; 土壤有效钾含量明显下降; 碱解氮、有效磷及有机质含量随开垦年限的增加呈现先下降再升高的趋势^[6]。张晓东等^[9]在玛纳斯河流域的研究发现, 短期垦种 (0~9 年) 有利于提高新疆绿洲农田土壤肥力, 而长期垦种 (>13 年) 则造成土壤板结、次生盐渍化和土壤有效养分含量降低。滴灌年限越长, 棉田中的盐分积累就越多^[5]。孟超然等^[10]对玛纳斯流域膜下滴灌农田耕层 (0~20 cm) 土壤盐分 15 年的变化规律研究表明, 长期膜下滴灌模式中, 灌溉水带入的盐分会导致耕层土壤养分累积。杨未静等^[11]对北疆膜下滴灌棉田连续三年监测发现, 该区域内不同土壤剖面含盐率逐年增大, 同时盐分逐渐下移并主要积累在 80 cm 以下土层, 土壤由初始的非盐渍化土或轻度盐渍化土逐渐退化为中度甚至重度盐渍化土壤。在南疆, 膜下滴灌加剧了盐分侧向运移并导致膜间大量积盐。苗期盐分累积在膜间 0~40 cm 土层, 吐絮期 0~60 cm 土层盐分均有所增加, 尤其是在膜间

0~20 cm 土层盐分大量累积形成聚盐带, 严重时会影响下一季棉花的生长, 因此需进行冬灌和春灌压盐^[12]。综上, 以往此类研究基本上是空间换时间的方式或者仅在短时间年限内讨论盐碱地垦殖后耕地质量的演变规律, 鲜有长期定点观测的研究, 因此, 以往研究无法反映盐碱地转化成为农田后伴随着长期耕种, 盐分在农田土壤剖面中的累积动态及其对耕地质量和产能提升的长期效应。

本研究选择位于新疆玛纳斯县包家店乡新疆农业科学院经济作物研究所育种基地分别在 1996、2005、2006、2007、2009、2010、2011 年开垦的田块进行了长期定位观测。在 2010、2011、2015 和 2020 年针对盐碱荒地和不同年份垦荒农田土壤的盐分和养分含量等指标进行了四次调查, 定位观测盐碱荒地开垦利用过程中土壤养分、盐分、pH 等耕地质量指标的变化。以期评价节水灌溉控盐条件对盐碱荒地垦种的环境生态影响以及干旱区绿洲农业的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验在新疆农业科学院经济作物研究所玛纳斯棉花育种基地(44° 18' N, 86° 22' E)进行。试验区位于天山北麓玛纳斯河流域冲积洪积扇缘, 地下水埋深3 m以上; 该区海拔约400 m, 年平均气温8.2°C, 年降水量180~270 mm, 总蒸发量1 000~1 500 mm。试验区土壤为硫酸盐灰漠土, 0~100 cm土层的砂粒、粉粒和黏粒的含量分别是80 g·kg⁻¹、640 g·kg⁻¹和280 g·kg⁻¹^[13], 钠吸附比(SAR) 3.9, 可交换钠百分比(ESP) 25.9%。荒地生长的植物主要为猪毛菜、牛皮菜、梭梭等。试验区从1996年开始开垦并种植棉花, 不同地块开垦年份不同。荒地经翻耕整地后, 第一年种植作物为油菜, 第二年开始种植棉花, 或者直接种植棉花。

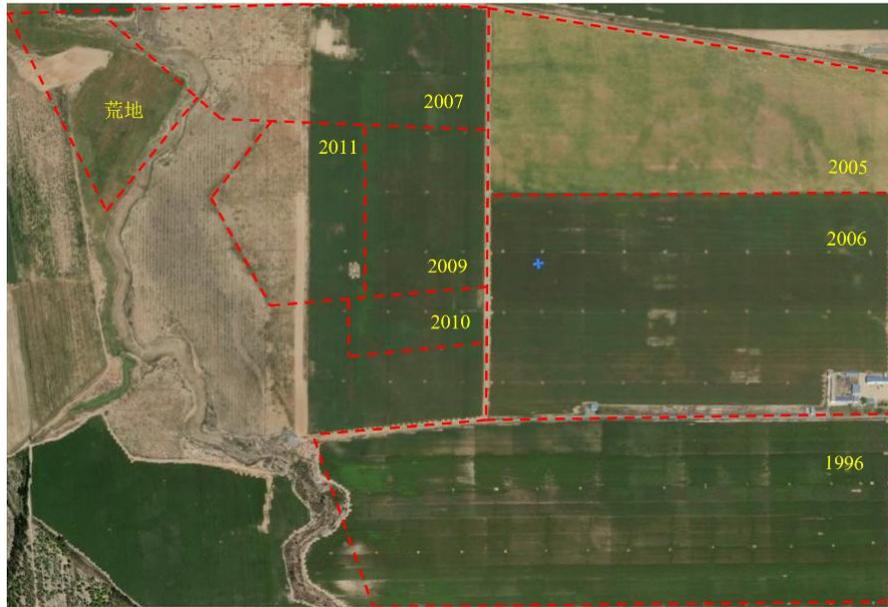
1.2 试验设计

本研究选择同一区域不同年份开荒地地块开展研究。不同年份(1996、2005、2006、2007、2009、2010、2011年等7个年份)开垦棉田的空间分布见图1。2010、2011、2015和2020年取样调查当年, 不同年份开垦样地的累积耕种年限见表1。未开垦荒地数据以2010年调查的数据为准。棉花种植方式为干播湿出、膜下滴灌, 无冬春灌。所有棉田施肥和灌溉方式基本一致, 每年棉花生长季为4—10月, 收获后秸秆还田。播种前磷肥(磷酸二铵或过磷酸钙)和钾肥(硫酸钾)撒施, 然后翻入20 cm深土层, 旋耕、耙、镇压后, 通过棉花播种机一次完成铺设滴灌带、铺膜、定量播种和覆土。苗期或蕾期追施磷肥(磷酸二氢钾)150 kg·hm⁻²和氮肥(尿素)450 kg·hm⁻²。2010、2011、2015和2020年种植棉花品种分别为新陆早47号(*Gossypium hirsutum* L.)、新陆早18号(*G. hirsutum* L.)、07-5(*G. hirsutum* L.)和新陆早61(*G. hirsutum* L.)。棉花每个生长季的总灌溉量为4 500~5 400 m³·hm⁻², 每年灌溉次数为8~10次, 每次300~600 m³·hm⁻²。采样日期均为每年的收获季, 收获后采集土壤样品。

1.3 样品采集

2010、2011、2015和2020年的调查均为在秋季棉花收获后用土钻采集土样。每一次调查时, 每个年限选择3个样点作为重复, 在每个采样点上用土钻采集0~20 cm(用于土壤养分测定)土壤样品, 每个样点在相距10 m以上范围内共采集4个点(包括2个播种行和2个非播种行)混合为一个样品。其中, 2010、2011、2020年采集了0~100 cm(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)土层的土壤样品, 测定了土壤盐度和pH。0~20 cm土层土壤样品风干后过1 mm筛, 分别测定有效磷(Olsen-P)、有机质、无机氮、速效钾。上述调查共涉及8块样地(7个不同年份开垦样地以及未开垦荒地), 在4个时间点(2010、2011、2015和2020年)采样, 每次采样每块样地取3个重复, 代表该区域八块样地在10年间土壤盐分和肥力变化的情况。

测定指标如下: 2010年测定了土壤总盐、有效磷、pH、有机质; 2011年测定了土壤总盐、有效磷、pH、有机质、无机氮、速效钾; 2015年测定了土壤总盐、有效磷、pH; 2020年测定了土壤总盐、有效磷、pH、有机质、无机氮、速效钾; 荒地(垦种年限为0)的各项指标来自2020年调查数据(未开垦荒地的无机氮及速效钾数据来自2011年调查数据)。



注：试验区域分布图中的数字代表各个地块开垦年份。Note: The numbers in the test area distribution map represent the reclamation years of each plot.

图 1 试验地区域分布图

Fig. 1 Test area distribution map

表1 不同年份开荒地块的垦种年数

Table 1 Number of years of cultivation after reclamation of plots with different reclamation years

| 调查年份/开荒年份 Year of survey /Year of cultivation | 垦种年数 Years after cultivation | | | | | | | |
|--|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 荒地 Uncultivated land | 1996 | 2005 | 2006 | 2007 | 2009 | 2010 | 2011 |
| 2010 年第 1 次调查 ^① | 0 | 15 | 6 | 5 | 4 | 2 | 1 | / |
| 2011 年第 2 次调查 ^② | 0 | 16 | 7 | 6 | 5 | 3 | 2 | 1 |
| 2015 年第 3 次调查 ^③ | 0 | 20 | 11 | 10 | 9 | 7 | 6 | 5 |
| 2020 年第 4 次调查 ^④ | 0 | 25 | 16 | 15 | 14 | 12 | 11 | 10 |

①First survey in 2010, ②Second survey in 2011, ③Third survey in 2015, ④Fourth survey in 2020.

1.4 指标测定方法

土壤含盐量测定：按照2.5:1的水土比配成悬浮液，振荡过滤后，取25 mL上清液置于30 mL坩埚中，用电热板加热，烘干，用差减法计算土壤总盐含量。土壤pH测定：采用2.5:1的水土比制成悬浮液，振荡过滤后直接用pH计测定上清液pH（pHS-3C pH计，上海雷磁仪器厂）。土壤有效磷（Olsen-P）采用碳酸氢钠（pH=8.5）浸提，钼锑抗比色法在882 nm波长下测定^[4]。土壤有机质用重铬酸钾外加热法进行测试。采用流动分析仪（SEAL Analytical GmbH，德国）测定土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量，无机氮含量为两者之和。土壤速效钾采用CaCl₂浸提后连续流动分析仪测定（AutoAnalyzer 3，德国）。

1.5 数据处理和分析

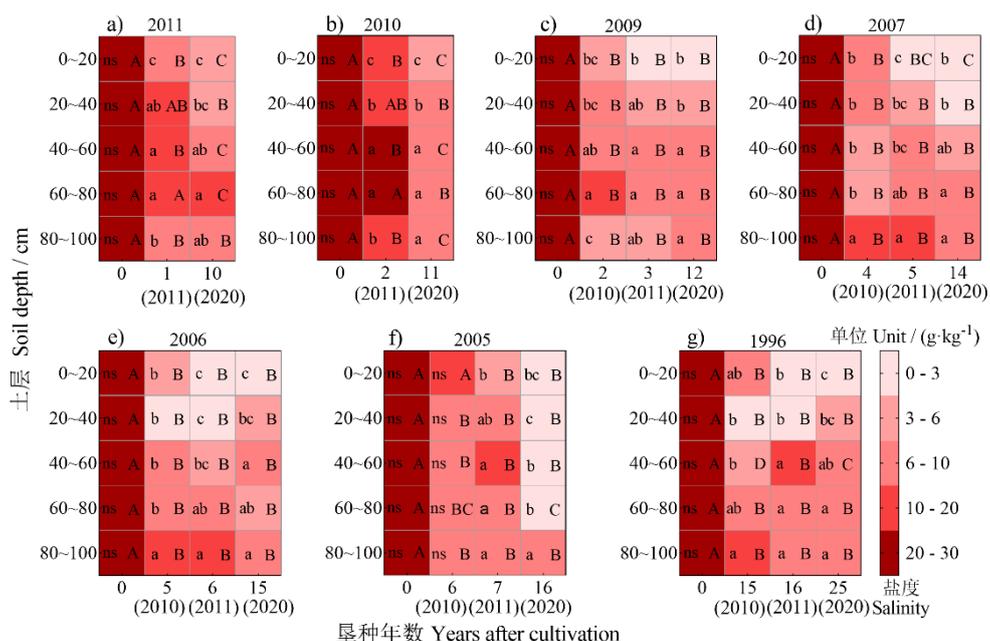
采用Excel 2016整理数据，采用SPSS 25软件对数据进行单因素方差分析，采用新复极差法（Duncan's multiple range test, $P \leq 0.05$ ）进行多重比较。百分数指标和比值等非连续变量经过反正弦转换后进行方差分析。本文采用Graphpad Prim 8软件进行作图。

2 结果

2.1 土壤盐度的变化

对同一区域荒地及不同年份开荒土地的土壤剖面(0~100 cm)盐度进行三次调查(2010、2011和2020年),结果(图2)显示:不同开垦年份地块的土壤剖面盐分下降速率不同,最近年份开垦地块土壤盐度下降速率较快。土壤剖面总盐随着土壤耕层深度的增加而增加;各个土层土壤总盐随垦种年数的增加呈现显著降低的趋势($P \leq 0.05$)。开垦前荒地表层(0~20 cm)总盐平均含量为 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。垦种1~5年后土壤表层总盐平均下降至 $6.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均下降速率为 $3.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;荒地垦种6~10年后,土壤总盐平均降至 $3.71 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均下降速率为 $1.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;荒地垦种11~15年后,土壤总盐平均降至 $2.11 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均下降速率为 $1.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;荒地垦种16~25年后,土壤总盐平均降至 $2.06 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (维持在 $1.67\sim 2.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),平均下降速率为 $0.92 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。荒地垦殖15年后,土壤总盐可达到非盐化-轻度盐渍化水平,继续垦种16~25年,土壤盐分基本维持稳定状态。

荒地垦种后各开垦年份地块土壤剖面盐分的变化表明,荒地垦种1~5年,土壤表层盐分减少,盐分主要聚集在40~60 cm和60~80 cm之间,总盐含量分别为 9.97 和 $10.23 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,降低速率分别为 3.66 和 $3.60 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;80~100 cm盐分平均值为 $8.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,年均降低速率为 $4.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。垦种6~10年,盐分向土壤底层移动,主要集中在60~80 cm和80~100 cm,平均值分别为 11.63 和 $10.91 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,降低速率分别为 2.19 和 $2.29 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;垦种11~15年,聚集在60~80 cm、80~100 cm土层的土壤含盐量持续降低,分别降至 8.00 和 $8.06 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,降低速率分别为 1.45 和 $1.46 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;垦殖16~25年,土壤60~80 cm、80~100 cm土层的盐分分别降至 6.22 和 $7.28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,降低速率分别为 1.08 和 $1.07 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。综上,荒地垦种1~5年后,土壤盐分主要聚集在40~80 cm土层,随着垦种年限增加,盐分向下迁移,主要聚集在80~100 cm土层,并且0~100 cm土层盐分含量整体呈现降低的趋势。



注: a) ~ g) 图上方数字代表各个地块开垦年份,横坐标数字代表同一地块三次调查土地垦种年数(0代表荒地未垦种、括号内年份分别代表2010、2011、2020年三次调查)。不同小写字母表示同一块地不同土层差异显著($P \leq 0.05$),不同大写字母表示不同垦种年数差异显著($P \leq 0.05$),ns代表无显著差异。下同。Note: a) ~ g) represent the year of reclamation for each plot, and the numbers on the x-axis represent the number of years of land reclamation for the same plot in three surveys (0 means the uncultivated land, the years in parentheses on the x-axis represent the three surveys in 2010, 2011 and 2020, respectively). Different lowercase letters indicate significant differences ($P \leq 0.05$) between different soil layers of the same plot, different capital letters indicate significant differences ($P \leq 0.05$) between different reclamation years, and ns means no significant difference. The same as below.

图2 不同垦种年限土壤剖面盐度的变化

Fig. 2 Changes of salinity in soil profile with different years after cultivation

2.2 土壤pH的变化

对荒地及不同年份开垦土地土壤剖面的pH进行三次调查（2010、2011和2020年），结果表明，表层（0~20 cm）土壤的pH随着垦种时间的增加整体上呈现降低的趋势（ $P \leq 0.05$ ）。开垦1~10年，土壤表层pH由开垦前的8.88降至8.32，降低了0.56个单位。开垦11~25年，土壤表层pH降至8.22（降低了0.66个单位）并维持相对稳定（图3）。

荒地不同土层pH随着剖面深度的增加而升高。荒地表层土壤pH为8.88，80~100 cm土层pH为9.14；垦种1~5年后，土壤剖面各土层（0~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm）pH均显著降低（ $P \leq 0.05$ ），与荒地相比，分别降低了0.61（8.28）、0.69（8.36）、0.79（8.29）、0.65（8.38）和0.64（8.50）个单位。垦种6~10年，表层土壤pH上升，而20~100 cm土层pH降低。垦种11~15年，各层土壤pH均有降低的趋势，但表层土壤pH仍高于其他土层。垦种16~25年，各层土壤pH已无显著差异，pH维持在8.18~8.27之间（图3）。综上，各土层pH整体上随垦种年限的增加呈现降低的趋势，最终稳定在8.18~8.27之间。

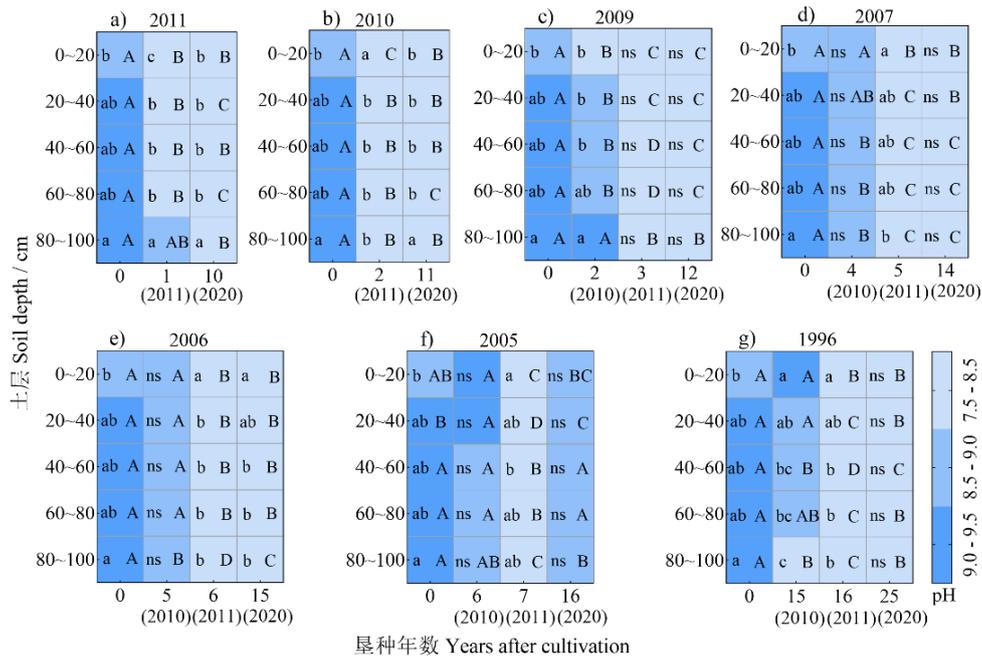


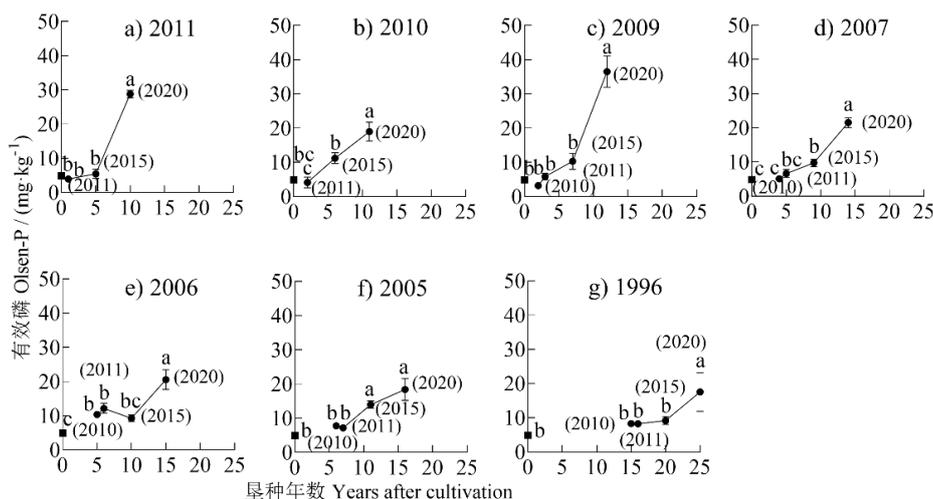
图3 不同垦种年限土壤剖面 pH 的变化

Fig. 3 Changes of soil profile pH with different years after cultivation

2.3 耕层土壤养分的变化

2.3.1 土壤有效磷的变化

盐碱荒地垦殖显著提高了土壤有效磷含量。荒地有效磷为 $4.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，垦种1~5年后，不同年份开垦地块有效磷含量变化不明显，各地块有效磷平均为 $5.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。荒地垦种6~10年后有效磷含量显著增加（ $P \leq 0.05$ ），各地块的平均含量为 $12.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，较荒地增加 $7.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，增加速率为 $0.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。垦种11~15年后有效磷增加幅度显著变大（ $P \leq 0.05$ ），各地块有效磷的平均含量达到 $19.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，较荒地增加 $15.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，增加速率为 $1.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。垦种16~25年后，土壤有效磷增加的速率降低（ $P \leq 0.05$ ），增加速率降至 $0.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。不同年份开垦地块土壤有效磷含量增加的幅度不同，最近年份开垦的地块有效磷含量增加幅度较大（图4）。



注：横坐标年份代表同一地块四次调查土地开垦利用年限。纵坐标上的数据点为荒地数据。不同小写字母表示差异显著 ($P \leq 0.05$)。误差线代表标准误差($n=3$)。下同。Note: The year on the x-axis represents the years of land reclamation and planting of the four surveys in the same plot. The data point in y-axis is uncultivated land data. Different lowercase letters indicate significant differences ($P \leq 0.05$). Error bars represent SEs ($n = 3$). The same as below.

图 4 不同垦种年限土壤有效磷的变化

Fig. 4 Changes of soil available phosphorus with different years after cultivation

2.3.2 土壤无机氮的变化 荒地土壤的无机氮含量为 $3.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。开垦1~5年后，土壤无机氮含量无显著变化，各地块无机氮含量平均为 $5.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。垦种6~10年后，土壤无机氮含量显著增加 ($P \leq 0.05$)，各地块无机氮含量达到 $20.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，较荒地增加 $16.73 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，年增加速率为 $1.94 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。垦种11~15年，土壤无机氮含量处于快速增加阶段 ($P \leq 0.05$)，各地块无机氮含量提高至 $29.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，较荒地增加 $26.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，年增加速率为 $2.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。垦种16~25年，土壤无机氮含量平均为 $18.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，基本处于稳定阶段 (图5)。

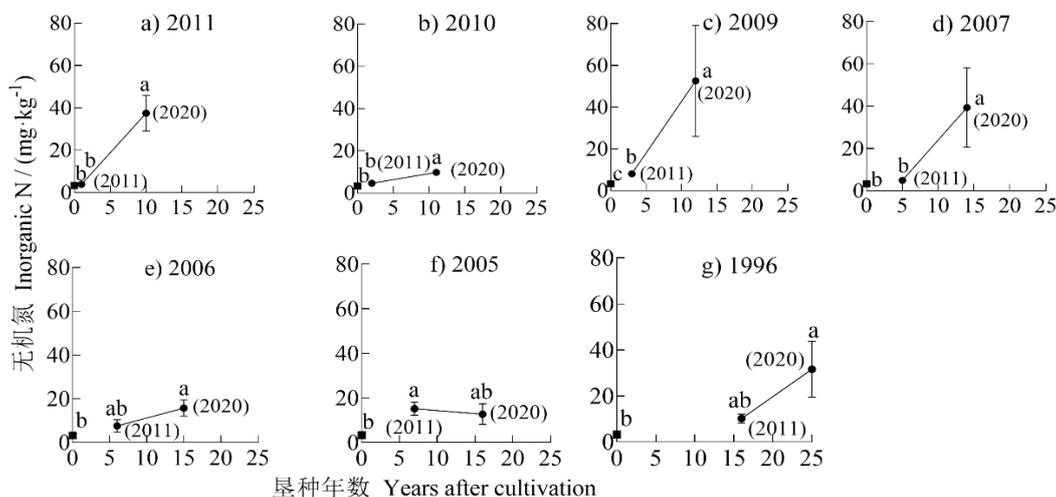


图 5 不同垦种年限土壤无机氮的变化

Fig. 5 Changes of soil inorganic nitrogen with different years after cultivation

2.3.3 土壤速效钾的变化 盐碱荒地土壤的速效钾平均含量为 $525.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。盐碱地垦殖后，土壤速效钾含量整体上呈现先降低后增加的趋势。垦种1~5年后，土壤速效钾含量急速下降 ($P \leq 0.05$)，各地块土壤速效钾含量平均较荒地降低了 $312.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，下降至 $212.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，年降低速率为 $189.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。垦种6~15年，土壤速效钾含量开始缓慢回升至初始水平，土壤速效钾含量平均为 $527.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。垦种16~25年后，土壤速效钾含量处于相对稳定阶段，平均含量为 $570.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图6)。

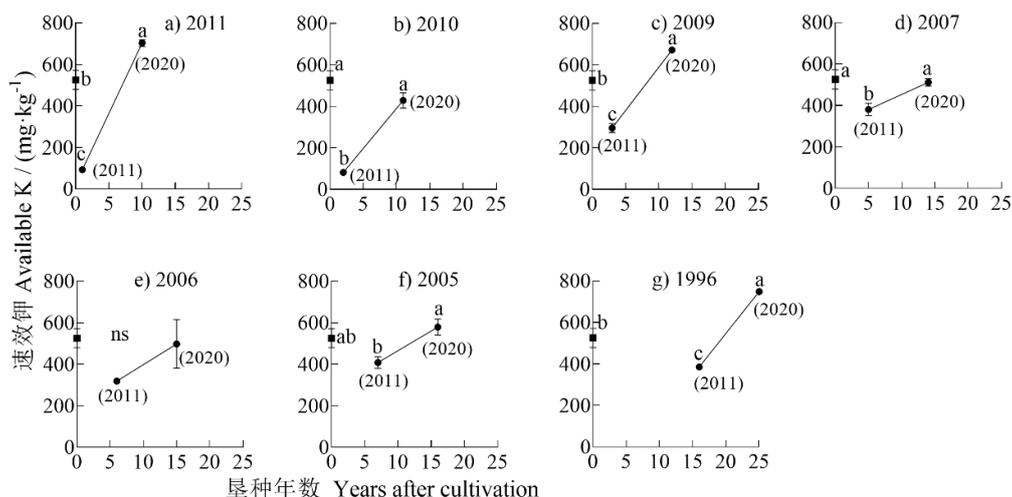


图 6 不同垦种年限土壤速效钾的变化

Fig. 6 Changes of soil available potassium with different years after cultivation

2.3.4 土壤有机质的变化 荒地土壤有机质平均含量为 $5.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。整体而言，垦种1~5年，土壤有机质含量增加幅度较缓慢；垦种6~10年，土壤有机质含量显著增加 ($P \leq 0.05$) 并处于快速增加阶段；垦种11~15年，各地块土壤有机质含量增加幅度降低；垦种16~25年，增加趋势与垦种11~15年的土壤有机质增加幅度相似 (图7)。与荒地相比，垦种1~5年后土壤有机质含量平均增加 $2.53 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；垦种6~10年后各地块土壤有机质含量平均增加 $5.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，增加速率为 $1.24 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ；垦种11~15年后，各地块土壤有机质含量平均增加 $3.90 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，增加速率为 $0.72 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ；垦种16~25年，各地块土壤有机质含量平均增加 $4.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，增加速率为 $0.35 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (图7)。

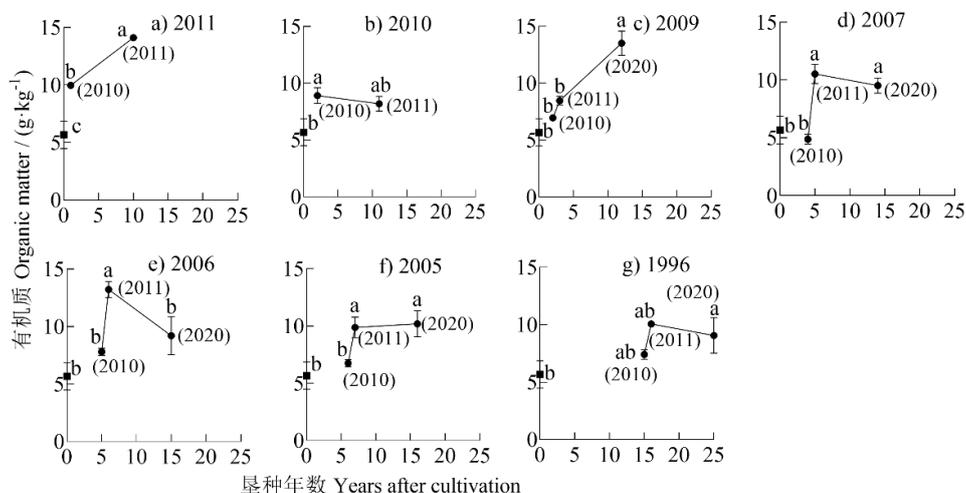


图 7 不同垦种年限土壤有机质的变化

Fig. 7 Changes of soil organic matter with different years after cultivation

3 讨论

盐碱地开荒种植作物后土壤质量的变化，尤其是盐度、有机质含量和 pH 的变化是人们关注的焦点。以往研究主要是短期调查，以空间换时间的方式评价盐分、pH 和养分的演变，这种方法的前提是样地初始的土壤养分、有机质和盐分在空间分布上是均匀的，但根据本研究对不同地块的调查，土壤理化性质具有很大的空间异质性。因此，这种空间换时间的调查方法无法准确反映盐碱荒地垦殖后土壤盐分和养分变化的真实情况。本文采用对

同一地块进行多年定位观测的方法开展研究。假设在同一个农场里（拥有约 70 hm² 棉田），种子、农药和化肥的种类在一年内是相同的；不同年际间种子、农药、肥料和灌溉水的用量、用法以及耕作栽培管理措施在不同样点之间基本是一致的。因此，本文选了 7 个不同年份开垦的样点，设置三次重复，研究结果能更加真实地反映土壤盐分和养分的变化规律。

3.1 荒地垦殖后土壤盐分和pH的变化

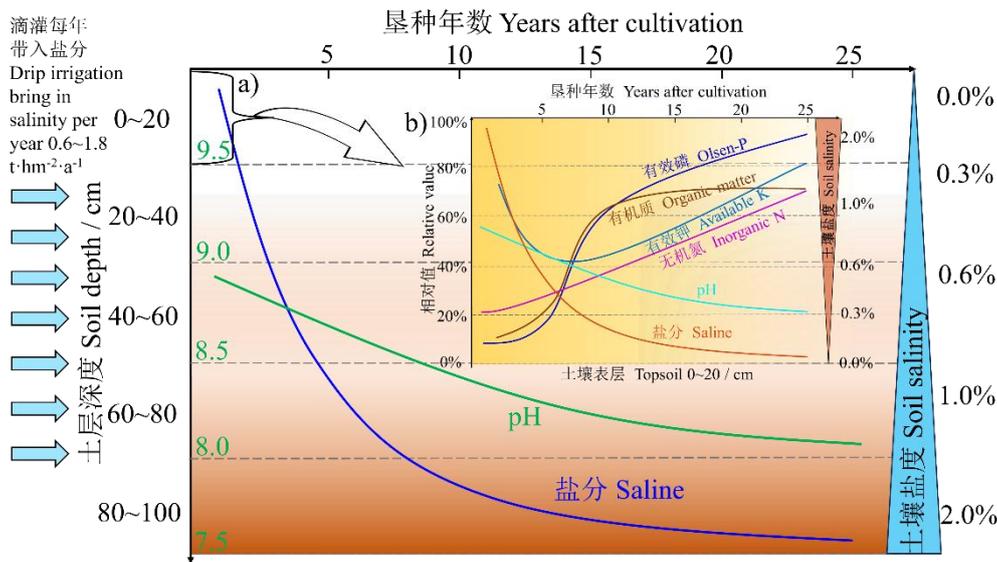
土壤盐分和pH是棉花生长的首要限制因子。前期对同一地块采用空间换时间的方法研究发现，开荒植棉后土壤盐分和pH显著降低^[7]。本研究同样发现，盐碱荒地开垦植棉过程中，土壤盐分和pH均显著降低（图2和图3）。随着土地开垦利用，表层盐分明显降低，开垦利用5~10年后从荒地的20.0 g·kg⁻¹下降至3.71 g·kg⁻¹，垦种11~25年，盐分基本维持在2.06~2.11 g·kg⁻¹范围之内（图2），这与Liu等^[7]的研究结果基本一致，即土壤盐分在开垦后呈现显著降低趋势，垦种5年后基本稳定在较低的水平。西北内陆盐碱区的土壤盐分强度划分为非盐化（< 3 g·kg⁻¹）、轻微（3~6 g·kg⁻¹）、中度（6~10 g·kg⁻¹）、高度（10~20 g·kg⁻¹）和极高盐分（> 20 g·kg⁻¹）^[15]。本研究中，盐碱荒地开垦15年后，土壤总盐可达到非盐化-轻度盐渍化水平，垦种16~25年后，土壤表层盐分基本维持在非盐化水平。土壤剖面总盐含量整体上呈现降低的趋势（图2），可能是长期滴灌将盐分淋洗到了更深层土壤。然而，本研究的采样深度仅为0~100 cm，所以盐分在土壤剖面运移的结果可能存在一定局限性，今后应继续对耕种年限更长地块0~200 cm 土层的盐分变化开展监测。此外，本研究结果表明，灌溉水每年输入的盐分（0.6~1.8 t·hm⁻²）对长期滴灌条件下土壤盐分累积及作物生长的影响不明显（图2，图8）。

土壤pH受成土母质、地形地貌特征、自然气候条件、植被情况以及耕作历史等因素的影响，因而具有显著的区域性特征^[16]。根据中国土壤酸碱度划分标准^[17]，研究区土壤pH均大于7，属于碱性土壤。土地利用方式改变会造成土壤碱化程度的变化^[18]。开垦1~5年，不同地块的土壤pH均呈快速下降趋势，垦种后6~15年，表层pH（8.01~9.18）高于其他土层，耕层土壤出现了明显的pH上升（碱化）现象，其他土层降低（图3），这与同一区域用空间换时间的研究方法得出的结果^[8]相同。然而，本课题组在2015年用空间换时间的方法调查发现耕层土壤并未出现碱化现象^[7]。本研究通过对不同地块连续调查观测发现，耕层土壤脱盐碱化是盐碱地在垦种过程中的真实变化规律。这种脱盐碱化现象可能因为原始土壤碱化度较高（交换性钠百分比ESP为25.9%），开垦前土壤盐分高、渗透性差，未表现出碱化现象；开垦之后通过灌溉和淋洗盐分降低，土壤渗透性改善，更多的钠离子进入土壤溶液，继而出现了碱化现象^[4]。

3.2 荒地垦殖后土壤养分的变化

土壤重盐渍化和高pH不仅限制棉花生长，而且会造成土壤养分有效性降低。本研究发现，土地垦种植棉后对土壤有效磷有较大提升（图4），而磷素有效性低则是新疆盐渍化农田棉花高产的主要限制因子^[19]。新疆棉区石灰性土壤中含有大量的Ca²⁺，极易与土壤中的磷结合生成一系列的Ca-P化合物，大大降低磷的有效性^[20]。有研究证明，盐渍土壤中作物的含磷量与非盐土相比下降20%~50%^[21]。磷对作物的生长、产量及品质均具有重要影响^[22]。土壤有效磷是评价土壤供磷能力的重要指标^[23]。荒地开垦利用后，土壤有效磷含量显著增加，垦种6~10年后从荒地的4.91 mg·kg⁻¹增至12.05 mg·kg⁻¹，垦种11~15年为快速增加阶段，有效磷含量能够提升至19.97 mg·kg⁻¹（图4）。土壤有效磷在垦种前期的提升可能是开垦增加了土壤的表面积，促进磷的释放和解吸附，垦种后期主要是施肥导致有效磷的快速提升^[24]。荒地开垦利用后土壤磷素肥力得到了显著提升，根据前人研究中磷素肥力的划分标准^[25-26]，该区荒地垦种后土壤的磷素肥力水平由低肥力转化为中高肥力水平。土壤无机氮含量在开垦1~5年后无显著变化，垦种6~15年后显著增加，垦种16~25年基本处于稳定阶段（图5）。土壤速效钾能够直观反映土壤钾素水平和供应能力，是棉花可获取的主要养分^[27]。土壤速效钾含量在开垦1~5年后由荒地的525.3 mg·kg⁻¹急速下降至212.6 mg·kg⁻¹，之后经过11~15年的缓慢增加恢复至初始水平（图6），这可能是由于荒地开垦种后，土壤有效钾被吸收利用，而管理过程中未及时施用钾肥，导致土壤速效钾快速下降^[24]。土壤有机质具有协调土壤养分、水分和气、热的功能，是土壤肥力的主要指标^[1]。石灰性土壤中大量的Ca²⁺可形成黏土团聚体与有机质的“桥”，有机质含量高能促进团聚体形成和稳定，土壤有机质含量低，则不易形成团粒结构，土壤供水供肥能力较差^[28]。本研究发现，土壤有机质含量在垦种5年后开始显著增加（图7）。开垦植棉后秸秆还田、施肥等人类活动增加了土壤有机质含量，但由于荒地开垦后土壤呼吸作用加强土壤有机质分解速度加快，导致土壤碳的损失^[24]，因此垦种1~5年间土壤有机质含量增加不明显（图7）。

综上,通过对同一区域不同年份开垦地块进行多年定位观测发现,荒地垦种后盐分、养分演变的规律与本课题组在前期用空间换时间的方法得出的结果既有相同也有不同,说明不同田间管理措施对盐碱障碍因子的消减具有不同作用。本研究的结果表明,荒地开垦为耕地后耕层(0~20 cm)土壤盐分显著降低,在垦种6~10年后达到轻度-中度盐土的水平,随后土壤盐度维持在 $2.06\sim 2.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,达到非盐化水平;土壤pH在垦种初期呈现迅速下降趋势,随后维持在8.2~8.5之间,属于微碱性。土壤有机质含量在垦种6~10年开始显著增加,但总体上偏低,维持在 $5.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤速效氮磷钾含量在开垦种植棉花以后均有显著增加,土壤无机氮含量在垦种6~15年处于显著增加阶段,垦种16~25年基本维持稳定;速效磷水平在 $13.33\sim 19.97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,属于比较适宜的水平。上述结果表明,盐化灰漠土荒地开垦利用转变为农田过程中降低了根层(0~20 cm)土壤的盐度,这些盐分在垦殖25年中主要积累在了80~100 cm土层中。盐化灰漠土转化为耕地后大约需要6~10年时间,耕地质量可达到良田水平(图8)。



注: a) 图主要代表各土层(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)土壤盐分及pH随垦种年份的变化规律;内部 b) 图为土壤表层(0~20 cm)土壤盐分、pH 以及养分随垦种年数的变化。Note: Panel a) shows the changes in soil salinity and pH in each soil layer (0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm) with the time of cultivation; Inside panel b) shows the changes of soil salinity, pH, and nutrients content in the topsoil (0-20 cm) with the time of cultivation.

图 8 不同垦种年限土壤盐分及养分的变化规律

Fig. 8 Changes of soil salinity and nutrients with different years after cultivation

4 结论

荒地开垦为耕地后,耕层土壤盐分显著降低,垦种6~10年后达到轻度-中度盐渍化水平,垦种11~25年后耕层土壤达到非盐化水平,盐分主要积累在80~100 cm土层。耕层土壤pH在垦种16~25年后基本维持在8.18~8.27之间。垦种6~10年后,土壤有机质、无机氮、有效磷均显著增加,土壤有效钾含量恢复至至初始水平,耕地质量可达到良田水平。本研究为内陆干旱区盐碱地开发、耕地质量提升提供了理论依据,对于盐碱地改良利用的长期生态环境效应评价具有重要参考意义。

参考文献 (References)

- [1] Sun B, Zhu A N, Yao R J, et al. Research progress on barrier remediation technology and productivity enhancement model for fluvo-aquic soil, red soil, and saline-alkali soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(5):1231-1247. [孙波,朱安宁,姚荣江,等.潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展[J].土壤学报,2023,60(5):1231-1247.]

- [2] Yang R, Su Y Z, Wang M, et al. Field-scale spatial and temporal variation of soil organic carbon in a reclaimed sandy farmland[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4): 1078-1083. [杨荣, 苏永中, 王敏, 等. 新疆沙地农田土壤有机碳时空变异特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1078-1083.]
- [3] Zong R, Influence mechanism of freezing-thawing action and autumn-tillage patterns on the soil quality of cotton field with long-term drip irrigation in North Xinjiang[D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2022. [宗睿. 冻融及秋耕方式对北疆长期滴灌棉田土壤质量的影响机理[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2022.]
- [4] Tian C Y, Zhou H F, Liu G Q. The proposal on control of soil salinizing and agricultural sustaining development in 21's century in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2000, 23(2): 177-181. [田长彦, 周宏飞, 刘国庆. 21 世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2): 177-181.]
- [5] Chen L M, Li Y H, Li F D, et al. Analysis of moisture, salt and nutrient transport before and after drip irrigation under mulch in soil of cotton fields in Manas River basin[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(8): 1-13. [陈霖明, 李艳红, 李发东, 等. 玛纳斯河流域棉田膜下滴灌前后土壤水分-盐分-养分运移分析[J]. 中国土壤与肥料, 2022(8): 1-13.]
- [6] Gu H B, Wang Z, Wu H Q, et al. Research on temporal and spatial distribution characteristics of soil nutrient and salt under different reclamation years[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(3): 8-15. [谷海斌, 王泽, 武红旗, 等. 不同开垦年限土壤养分和盐分时空分布特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 8-15.]
- [7] Liu S L, Maimaitiaili B, Joergensen R G, et al. Response of soil microorganisms after converting a saline desert to arable land in central Asia[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 98: 1-7.
- [8] Zhang S M, Bai D S, Liu S L, et al. Effects of land reclamation years on the distribution characteristics of soil salinity, fertility and nitrate nitrogen under mulching drip irrigation[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, 55(11): 2060-2068. [张少民, 白灯莎, 刘盛林, 等. 覆膜滴灌条件下土地开垦年限对土壤盐分、养分和硝态氮分布特征的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(11): 2060-2068.]
- [9] Zhang X D, Liu Z G, Maimaitiaili R S L T. The variation of soil physicochemical properties in farmlands with different cultivation years in oasis of Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 13-18. [张晓东, 刘志刚, 热沙来提·买买提. 不同开垦年限对新疆绿洲农田土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 13-18.]
- [10] Meng C R, Yan L, Zhang S J, et al. Variation of soil salinity in plow layer of farmlands under long-term mulched drip irrigation in arid region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1386-1394. [孟超然, 颜林, 张书捷, 等. 干旱区长期膜下滴灌农田耕层土壤盐分变化[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1386-1394.]
- [11] Yang W J, Tumulbai H D, Minadora M L X T. Spatial distribution characteristics of salt in drip irrigation cotton field under mulch[J]. Water Saving Irrigation, 2020(9): 58-63. [杨未静, 虎胆·吐马尔白, 米力夏提·米那多拉. 膜下滴灌棉田盐分空间分布特征分析[J]. 节水灌溉, 2020(9): 58-63.]
- [12] Liu X Y, Tian C Y. Study on dynamic and balance of salt for cotton under plastic mulch in South Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 82-85. [刘新永, 田长彦. 棉花膜下滴灌盐分动态及平衡研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 82-85.]
- [13] Lu X J, Wu H Q, Zhang L, et al. Changes of soil profile salt on different reclaimed years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 229-232. [卢响军, 武红旗, 张丽, 等. 不同开垦年限土壤剖面盐分变化[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 229-232.]
- [14] National Soil Census Office. China soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. [全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.]
- [15] Abuduwaili J, Tang Y, Abulimiti M, et al. Spatial distribution of soil moisture, salinity and organic matter in Manas River watershed, Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(4): 441-449.
- [16] Zhao X Q, Pan X Z, Ma H Y, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5):1248-1263. [赵学强, 潘贤章, 马海艺, 等. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J]. 土壤学报, 2023,60(5):1248-1263.]
- [17] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [18] Yang H, Xu C C, Sai M, et al. Effects of land use on soil moisture, pH and electrical conductivity[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(11): 1922-1927. [杨红, 徐唱唱, 赛曼, 等. 不同土地利用方式对土壤含水量、pH 值及电导率的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(11): 1922-1927.]
- [19] Zhang S M, Huo W G, Maimaitiaili B, et al. Manure application enhanced cotton yield by facilitating microbially mediated P bioavailability[J]. Field Crops Research, 2023, 304: 109153.

- [20] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(2): 173-195.
- [21] Grattan S R, Grieve C M. Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops[J]. *Scientia Horticulturae*, 1998, 78(1/2/3/4): 127-157.
- [22] Wang S M, Wang J K, Li S Y, et al. Study of soil organic matter and available nutrients'Variation after reclamation in "farm 853"[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(2): 342-346. [王淑敏, 汪景宽, 李双异, 等. “八五三”农场土壤开垦后有机质及土壤速效养分变化的研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43(2): 342-346.]
- [23] Li Q J, Zhang Y, Yibat H, et al. Abundance index and critical level of phosphorus in cotton soils under flooding and drip irrigation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 927-934. [李青军, 张炎, 哈丽哈什·依巴提, 等. 漫灌和滴灌棉花土壤有效磷丰缺指标与临界值研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4): 927-934.]
- [24] Ma X, Gao X, Liang F. Analysis on the evolution trend of cultivated land soil fertility in drip irrigation cotton field in Xinjiang in 35 years—Taking Fangcaohu Farm as an example[J]. *Fertilizer & Health*, 2022(3): 7-10, 31. [马旭, 高翔, 梁飞. 新疆滴灌棉田 35 年耕地土壤肥力演变趋势分析——以芳草湖农场为例[J]. *肥料与健康*, 2022(3): 7-10, 31.]
- [25] Su H B, Zhang Q T, Ni K W. Survey and reconstruction opinions of middle and low yield fields in Hami area [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 1998, 35(4): 174-177. [苏宏斌, 张庆庭, 倪克文. 哈密地区中低产田调查及改造意见[J]. *新疆农业科学*, 1998, 35(4): 174-177.]
- [26] Xu W. Analysis on soil salinization types and fertility of cultivated land in desert transition zone in Hotan area[D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2021. [徐伟. 和田地区荒漠过渡带耕地土壤盐渍化类型与肥力分析[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2021.]
- [27] Yang X Y, Yu Q Q, Geng J B, et al. Effects of coated potassium chloride containing mepiquat chloride on cotton yield and soil potassium[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6): 1439–1448. [杨修一, 于起庆, 耿计彪, 等. 包膜含缩节胺氯化钾对棉花产量及土壤钾素的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(6): 1439–1448.]
- [28] Barzegar A R, Nelson P N, Oades J M, et al. Organic matter, sodicity, and clay type: Influence on soil aggregation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(4): 1131-1137.

(责任编辑: 陈荣府)