

开垦年限对干旱区土壤理化性质及剖面无机碳的影响

邓彩云^{1,2,3}, 王玉刚^{1,2}, 牛子儒^{1,2,3}, 李彦^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院阜康荒漠生态系统国家站, 新疆 阜康 831505; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为阐明开垦年限对土壤理化性质及无机碳的影响, 进一步了解干旱区土地开垦进程中的土壤质量变化规律和碳吸收与存储过程, 以开垦年限分明的典型区—新疆三工河流域阜北农场为研究区, 调查、分析了不同开垦年限(已开垦 0, 1, 3, 5, 15, 30, 50 a)剖面土壤的 pH 值、盐分、无机碳含量与储量的分布特征、变化规律及开垦年限对它们的影响。结果表明: (1) 已开垦土地的土壤 pH 值随土层深度的增加而升高; 随开垦年限的延长, 0—60 cm(耕作层)的土壤 pH 值显著降低($P < 0.05$), 60—140, 140—200 cm 土壤 pH 值则升高。不同开垦年限的土壤盐分在剖面上呈“S”型分布, 研究区土壤盐分为表聚型; 随着开垦年限的延长, 土壤盐分聚集层逐渐下移, 各剖面平均含盐量减少。开垦历史的延长, 有助于排盐排碱。(2) 不同开垦年限的土壤无机碳含量与储量: 0—60 cm 显著低于 60—140 cm, 60—140 cm 显著低于 140—200 cm ($P < 0.05$)。随着土层深度的增加, 土壤无机碳储量占全碳的比例增大。随着开垦年限的延长, 0—60 cm 耕作层土壤无机碳含量、储量呈“减少—增加—减少”的变化趋势, 无机碳储量占全碳的比例减少。与原始荒地相比, 开垦 50 a 时, 0—60 cm 耕作层的土壤无机碳储量减少了 55%; 0—200 cm 土壤无机碳储量增加了 11.74 kg/m², 无机碳储量所占全碳的比例降低了 1.28%。(3) 开垦年限的延长对土壤 pH、盐分及无机碳的显著影响深度不同, 分别集中于 0—60 cm 耕作层, 0—140 cm 及整个研究深度范围内。

关键词: 开垦年限; 土壤剖面; 理化性质; 土壤无机碳; 显著影响深度

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0254-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.042

Effect of Land Reclamation Age on Soil Physicochemical Properties and Inorganic Carbon in Arid Areas

DENG Caiyun^{1,2,3}, WANG Yugang^{1,2}, NIU Ziru^{1,2,3}, LI Yan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011; 2. Fukang Station of Desert of Ecology, Chinese Academy of Sciences, Fukang, Xinjiang 831505; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: To understand variations in soil properties and the process of carbon uptake and store in arid areas under land reclamation interference, this paper mainly explored the impact of reclamation age on physico-chemical properties and soil inorganic carbon (SIC) in a depth of 0—200 cm soil profiles. Fubei farm of Sangong river catchment, a typical region with different reclamation history lands in Xinjiang province, was act as the study area. Soil profiles of lands in different reclamation years were used to analyze the variation of soil pH values, soil salt content and SIC. Our results showed that: (1) Soil pH enhanced with the increase of soil depth in farm lands. Besides, as the reclamation age extension, it was significantly decreased in 0—60 cm ($P < 0.05$) but increased in 60—140 cm and 140—200 cm soil profiles. Soil salinity was accumulated in top soils that salt content distributed as a type of “S” in soil profiles. With the reclamation age extending, the accumulation layer of soil salt went down gradually and the average value of salt content in each section decreased. It indicated that the extension of cultivation history contributed to moving salt and alkali. (2) The values of SIC content and storage in 0—60 cm were significant less than those in 60—140 cm ($P < 0.05$) and those in 140—200 cm soil profile ($P < 0.05$). The percentage of SIC ascended in vertical direction. SIC content, SIC storage and the percentage of SIC in 0—60 cm increased after first decreased and then decreased again with the reclamation age extending. Comparing with that in original lands, SIC storage in 0—60 cm of

fifty years reclamation age decreased by 55% and that in 0—200 cm increased by 11.74 kg/m² and the percentage of SIC also decreased by 1.28%. (3) The significantly influence of reclamation age on soil pH, salt and SIC were in different soil depth, respectively, in 0—60 cm, 0—140 cm and 0—200 cm.

Keywords: reclamation age; soil profiles; physicochemical properties; soil inorganic carbon; significantly influence depth

土壤是陆地生态系统重要的载体,参与地球关键带中物质、能量和信息的流动与转换^[1]。由全球变化和人类活动引起的土壤环境质量与物质汇集作用的变化,显著影响土壤安全和生物地球化学循环^[2-4]。因此,土壤碳平衡、分布、储量因全球气候变化问题备受关注。增加土壤碳库已被认为是今后换取工业CO₂减排的有效途径之一。目前,对土壤碳的研究多集中于有机碳储量与密度的分布及其对大气CO₂的影响,对无机碳(SIC)的研究相对薄弱。土壤无机碳是干旱半干旱区碳的主要存在形式,该区域面积广阔,对全球碳封存和大气CO₂平衡调节有重要意义。研究表明,无机碳的积累和淋失可能减少或增加大气中的CO₂浓度,从而改变全球碳平衡^[5-6]。干旱区灌溉排盐过程伴随的土壤无机碳汇数量可观,据估算全球每年约0.2 Pg C^[7]。新疆地处西北内陆,是我国最大面积的干旱区,区域内大部分为盐碱土,是研究SIC的理想场所。开垦、施肥和灌溉等人类活动不仅会影响土壤中游离碳酸钙数量,也会影响土壤团聚体的状况、微生物活性及土壤pH等,从而改变土壤理化性质和无机碳的储量与分布^[8-10]。许多研究已证实开垦年限对干旱区绿洲土壤理化性质、盐分、无机碳有影响,但多集中在土壤表层或耕作层^[11-12]。本文以新疆建设兵团阜北农场不同开垦年限土地为研究对象,分析其0—200 cm土壤理化性质、无机碳分布变化特征以及开垦年限对它们的影响,以期认识开垦历史的延长对剖面土壤无机碳存储和累积过程的影响以及对土壤理化性质的改变。研究结果一方面有助于理解在人为干扰下的土壤质量变化和潜在土壤碳库存储和聚积的响应特征;另一方面能为后备土地资源开发和生态建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阜北农场位于准葛尔盆地南缘,毗邻新疆博格达峰北麓,地理位置为87°49′—88°16′ E, 43°50′—44°22′ N,属于干旱大陆型气候,夏季炎热干燥,冬季严寒,降水量少,蒸发量大,日照时间长,昼夜温差大。流域内年均气温为6.6℃,最高气温42.3℃,最低气温-41.5℃,多年平均降水约为163 mm,多年平均潜在水面蒸发量约为900 mm。三工河流域地势南高北低,由东南向西北倾斜,流域平原区面积为942

km²,绿洲区面积为700 km²。阜北农场位于三工河流域的冲洪积平原上且隶属新疆建设兵团222团,农业管理方式较为统一,土地开垦时间具有梯度性。区域内主要有潮土、灰漠土、盐土3种土壤类型,土壤相对比较贫瘠,盐渍化比较严重。目前流域内耕种面积较大的农作物有棉花、玉米、葡萄、打瓜、葵花,生长季为5—10月,灌溉方式多采用滴灌,耕作多为机耕。原始荒地中的植被主要为琵琶柴(*Reaumuria soongorica*)、梭梭(*Haloxyylon ammodendron*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)以及众多的短命植物等。

1.2 研究方法

1.2.1 调查与土样采集 为揭示开垦年限对土壤理化性质及无机碳的影响,于2015年4月查阅222团土地管理部门条田资料并实地走访农户,确定阜北农场土地的开垦年限,选取代表性样地并采集土样。阜北农场建立于1959年,区域土地开垦灌溉时限至今已经超过50 a。结合调查结果,选取开垦年限分别为1, 3, 5, 15, 30, 50 a的代表性土地(土壤类型为盐土,当年种植作物为灌溉量相似的打瓜和葵花地,灌溉定为285~290 mm)各5块样地,每一类已开垦农田对应选取与其土壤类型相同、位置相近、受人为干扰较少的原始荒地作为背景参照。每块样地以10 m×10 m为样方,按“Z”型曲线,随机分布5个点,借助GPS定位后,用土钻按20 cm间隔分层取样,每个样地5点土样充分混合均匀。将土样进行去除杂物,人工破碎,放置于阴凉的通风室风干后充分研磨、过筛,备用。

1.2.2 数据测定与分析 参照《土壤农业化学分析方法》^[13],土壤无机碳含量采用气量法测定;有机碳采用重铬酸钾容量法—外加热法测定;pH和电导率采用pH计和电导仪分别测定5:1水土比的浸提液,根据公式^[14]换算确定土壤含盐量。土壤容重为挖剖面采用环刀法(100 cm³)采集,深度间隔为20 cm,置于烘箱烘干(105℃, 24 h)测定。全碳为有机碳和无机碳之和。无机碳储量参照Wang等^[15]的方法计算:

$$\text{SIC} = \sum_{i=1}^n \text{SIC}_i \times D_i \times H_i$$

式中:SIC为土壤无机碳储量(kg/m²);*i*为第*i*层土壤;*n*为土层数目;SIC_{*i*}为第*i*层土壤无机碳含量(g/kg);*D_i*为第*i*层土壤容重(g/cm³);*H_i*为第*i*层土层厚度(cm)。

基于作物根系分布特征和土壤分层特征,研究分析集中在耕作层(0—60 cm)、中层土壤(60—140 cm)、深层土壤(140—200 cm)。采用 Excel 软件对数据进行整理和计算,SPSS 20.0 软件进行统计分析,Origin 9.0 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面的 pH 值和盐分分布特征

由图 1(a)可知,研究区土壤 pH 值在 7.5~9.5 之间,呈碱性。其中,原始荒地的 pH 值随土层深度变化较小,没有显著性差异($P>0.05$);已开垦农田的 pH 值随深度增加而显著增加($P<0.05$)。在 0—60 cm 耕作层,已开垦农田的土壤 pH 值均低于原始荒地 pH 值,且随着开垦年限的延长,土壤 pH 值逐渐降低;在 60—140 cm 中层土层,已开垦农田的土壤 pH 值均随土壤深度逐渐增加;在 140—200 cm 深层土层,已开垦农田的 pH 值均高于原始荒地土壤 pH

值,且随开垦年限的延长而逐渐降低。由图 1(b)可知,研究区土壤盐分表现为表聚型,不同开垦年限农田的盐分含量随深度的增加呈“S”变化趋势,即先增加再减少。其中,各开垦年限的土壤剖面平均含盐量:0—60 cm>60—140 cm>140—200 cm。根据《新疆土壤》确定的盐碱化程度等级分类标准:土壤含盐量<3 g/kg,为非盐化土;3~6 g/kg,为轻度盐化土;6~9 g/kg,为中度盐化土;9~12 g/kg,为重度盐化土;>12 g/kg,为盐土^[14]。研究区内原始荒地 0—200 cm 剖面的平均含盐量为 12.36 g/kg,属于盐土。随着开垦历史的延长,土壤盐分聚集层逐渐下移,各剖面平均含盐量减少。在开垦 1,3 a 的土壤剖面中,盐分聚集层在 40—60 cm 处;开垦 5 a 农田,土壤盐分聚集层下移至 60—80 cm;开垦 50 a 农田土壤盐分的聚集层在 100—120 cm 处。特别是在 0—60 cm 耕作层,当原始荒地开垦为农田后,土壤盐分显著下降。

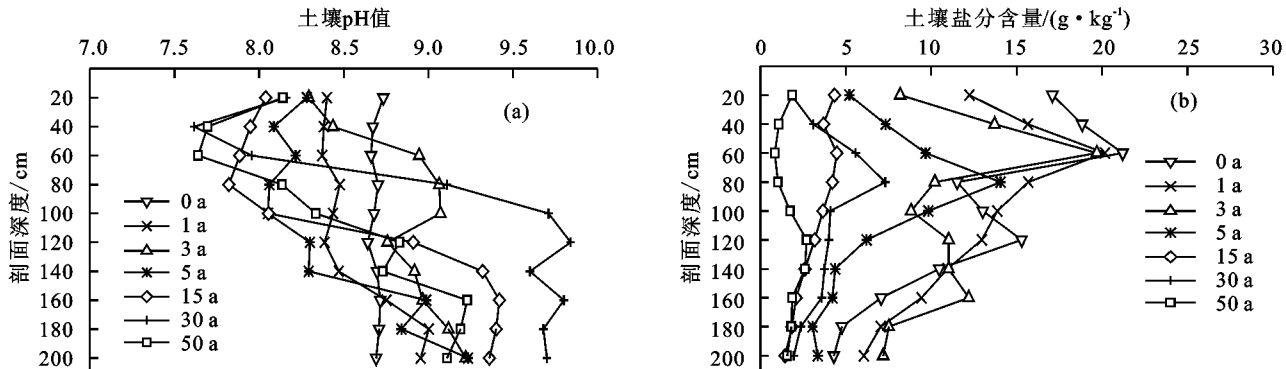


图 1 不同开垦年限农田土壤 pH 值和盐分垂直剖面

2.2 土壤无机碳含量的分布特征

由图 2 可知,在 0—200 cm 土壤剖面中,不同开垦年限农田的土壤无机碳含量分布特征具有相似性,呈现“S”型分布,各开垦年限的耕作层 0—60 cm 土壤无机碳含量均显著低于 60—140 cm 土壤无机碳含量和 140—200 cm 土壤无机碳含量($P<0.05$)。在 0—60 cm 剖面,未垦荒地和已开垦 1 a 的土壤无机碳含量随土层深度的增加呈现“减少—增加—减少”的变化趋势,已开垦 3,5,15,30 a 的土壤无机碳含量均随土层深度的增加而增加,且随着开垦年限的延长,变化的幅度减小;在 60—140 cm 剖面,土壤无机碳含量随土层深度的增加呈逐渐增加的变化趋势,且随着开垦年限的延长,增加的幅度变大;在 140—200 cm,除开垦年限为 5 a 的土壤剖面外,其他年限剖面的土壤无机碳含量随深度的增加而逐渐增加。

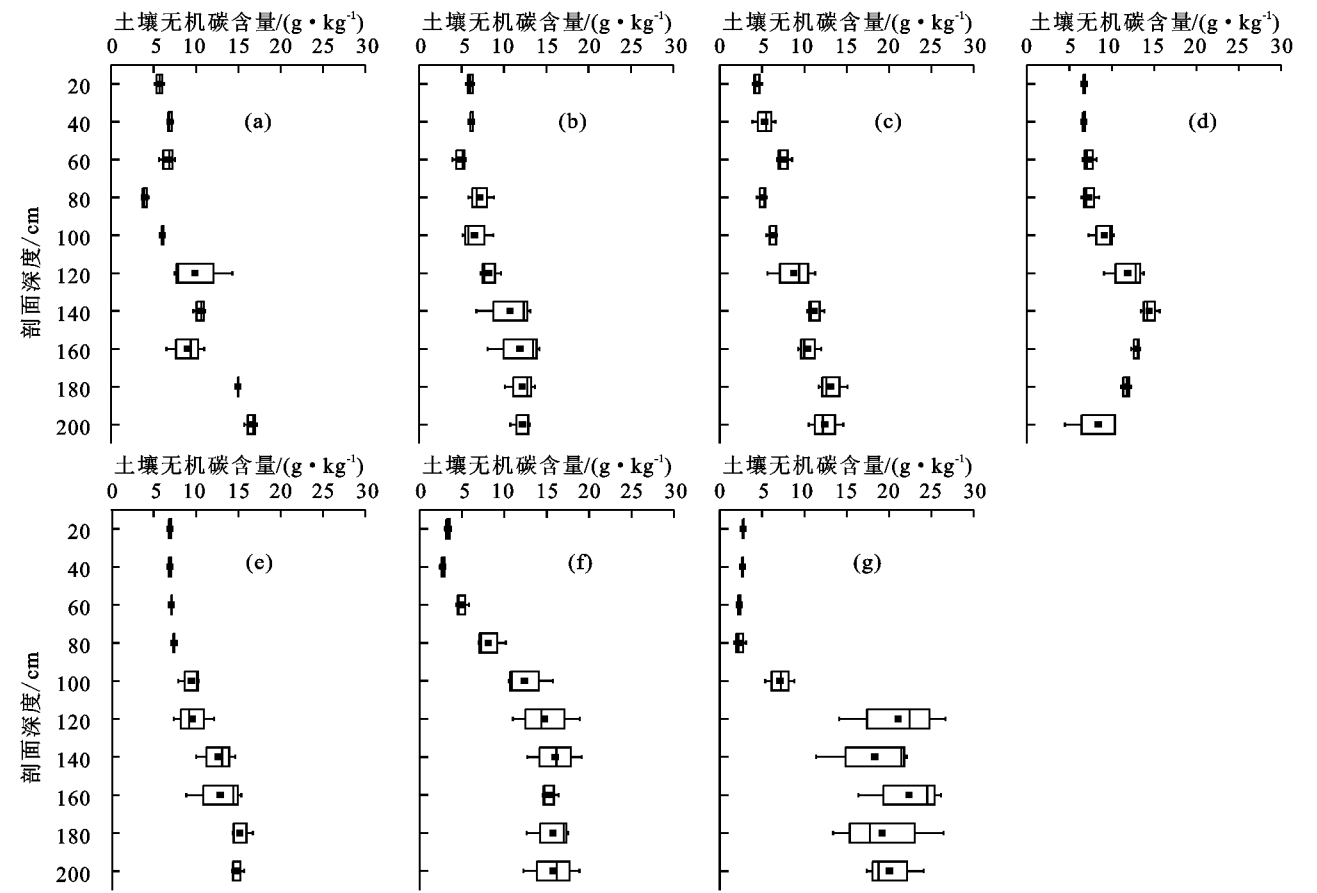
土壤无机碳储量在土壤剖中的变化趋势与土壤无机碳含量变化特征相似,在 0—200 cm 范围内,土壤无机碳主要储存在 140—200 cm 土层中。从表 1 可知,土壤无机碳占全碳的比例随土层深度的增加而增大;且各层变化趋势都相似,即先减少后增加。与原始荒

地相比,0—200 cm 土壤无机碳储量所占全碳比例在开垦 1 a 以后下降了 2.65%,开垦 50 a 时下降了 1%。耕作层土壤无机碳储量所占全碳比例在开垦 1 a 后下降了 4.07%,开垦 50 a 时下降了 34.21%。

2.3 土壤无机碳随开垦年限的变化规律

由图 3 可知,随着开垦年限的延长,0—60 cm 剖面土壤无机碳含量呈“减少—增加—减少”的变化趋势,无机碳储量的变化趋势与之相似。原始荒地 0—60 cm 土壤无机碳含量为 (6.44 ± 0.30) g/kg,开垦 30 a 时,含量显著减少($P<0.05$),开垦 50 a 时,无机碳含量降低 60%。60—140 cm 的土壤无机碳含量在开垦 30 a 时显著增加($P<0.05$),140—200 cm 剖面的土壤无机碳含量在开垦历史 50 a 时显著增加($P<0.05$),分别为 (12.81 ± 1.66) g/kg 和 (20.53 ± 2.32) g/kg。农田开垦 50 a 时,耕作层的土壤无机碳储量减少,60—140 cm 和 140—200 cm 的无机碳储量分别从原始荒地的 (10.30 ± 0.25) kg/m²、 (18.86 ± 0.23) kg/m² 增加到 (17.10 ± 0.74) kg/m² 和 (29.49 ± 1.11) kg/m²。随开垦年限的延长,0—200 cm 土壤全碳储量显著增加($P<0.05$),0—60 cm 土壤全碳储量先增加后减少,60—140,140—200 cm 的全

碳储量逐渐增加。随开垦年限的延长,土壤无机碳储量占全碳的比例在 0—60 cm 土层中显著减小($P<0.05$),在 60—140 cm 土层中先减少后增加,在 140—200 cm 显著增大($P<0.05$)(表 1)。



注:图中(a)(b)(c)(d)(e)(f)(g)分别为开垦年限 0,1,3,5,15,30,50 a 土壤无机碳含量。

图 2 不同开垦年限的土壤无机碳含量剖面分布

表 1 不同土层土壤全碳储量及无机碳占全碳储量百分比

开垦 年限/a	土壤全碳储量/(kg·m ⁻²)				无机碳占全碳储量百分比/%			
	0—60 cm	60—140 cm	140—200 cm	0—200 cm	0—60 cm	60—140 cm	140—200 cm	0—200 cm
0	8.01D	13.66D	18.40BC	40.08	64.82A	75.28AB	82.52E	76.58
1	7.91D	16.14BCD	15.71BC	39.77	60.79B	68.11C	86.34CD	73.83
3	7.78D	15.04CD	15.79BC	38.61	61.40B	73.01BC	85.58D	75.51
5	10.30AB	18.64ABC	14.07C	43.01	61.02B	78.51A	87.60BC	77.33
15	10.61A	19.38AB	18.14BC	48.13	48.91C	70.87BC	88.42BC	72.66
30	9.23C	22.26A	19.53B	51.02	30.60D	78.58A	89.52B	74.09
50	9.83BC	21.23A	24.93A	55.99	23.80E	79.55A	92.33A	75.30

注:同列不同大写字母表示差异显著($P<0.05$)。

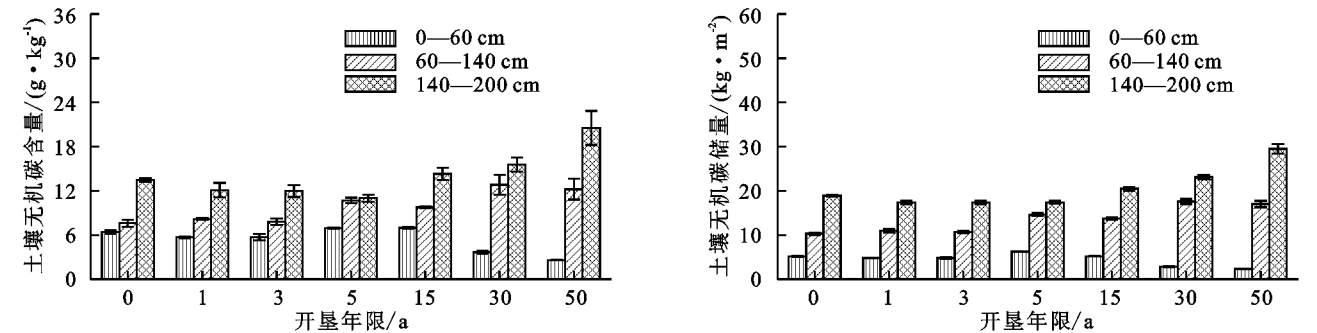


图 3 0—200 cm 剖面土壤无机碳含量与储量随开垦历史延长的变化趋势

2.4 土壤理化性质和无机碳与开垦年限的关系

由表 2 可知,对开垦年限与土壤 pH 值、盐分、无机碳做相关性分析表明:总体上,在研究深度范围内,pH 值与开垦年限呈弱的正相关,盐分与开垦

年限成显著负相关,土壤无机碳含量和储量与开垦年限均呈显著正相关。在 0—60 cm 耕作层,土壤 pH 值、盐分与无机碳含量和储量与开垦年限都呈显著负相关;在 60—140 cm 土层,土壤无机碳含量和储量与开垦年限呈显著正相关($P<0.05$),pH 值与其呈正相关但相关性不显著,土壤盐分与其呈显

著负相关;在 140—200 cm 土层,土壤无机碳含量和储量与开垦年限呈极显著正相关;pH 与其呈正相关,土壤盐分与其呈负相关。在耕作层,无机碳含量、盐分、pH 呈正相关,而在中层和深层土壤中,无机碳含量与 pH 呈正相关,与盐分含量呈显著负相关($P<0.05$)。

表 2 土壤 pH 值、盐分、无机碳与开垦历史的相关性

项目	开垦年限	pH	盐分	SIC 含量
开垦年限	1 / 1 / 1			
pH	-0.832* / 0.243 / 0.537	1 / 1 / 1		
盐分	-0.824* / -0.814* / -0.694	0.892** / -0.078 / -0.41	1 / 1 / 1	
SIC 含量	-0.862* / 0.838* / 0.941**	0.431 / 0.125 / 0.443*	0.53* / -0.574** / -.0457*	1 / 1 / 1

注: * 表示显著水平达 0.05, ** 表示显著水平达 0.01。每组 3 个数据分别为耕作层、中层、下层土壤各指标间的相关性。

3 讨论

在干旱区,土壤盐渍化问题一直是困扰绿洲农业可持续发展的关键。干旱区降水与蒸发不平衡,加之人类活动剧烈,这促进了土壤性质的改变和土壤碳的动态变化^[5]。一般而言,土壤 pH 受母质、气候、水文、成土条件、耕作灌溉等的制约;土壤盐分则受土壤温度、土壤类型、土地利用方式、地下水位等因素的影响^[16]。周丽等^[17]以同位于天山北坡的三工流域开垦 0,5,50,100 a 农田为研究对象,研究了开垦年限对土壤表层(0—50 cm)盐分的影响,研究表明开垦时间和土壤盐分含量呈负指数函数关系,开垦年限的延长可降低土壤 pH 和盐分。罗毅^[18]指出,由荒地开垦为农田并滴灌种植,随开垦时间的延长表现为脱盐的趋势,而在耕地的基础上采用滴灌,随着开垦时间的延长则表现为积盐的趋势。本研究结果表明,开垦年限会改变干旱区 0—200 cm 土壤的 pH 值,具体表现为长时间的开垦耕种有利于减少耕作层土壤中的碱性物质(图 1(a))。对比不同开垦年限盐分的剖面分布特点以及相关性分析发现,随着开垦时间的延长,盐分含量与开垦年限在各层都呈现显著负相关,且开垦 10,15,30 a 的农田属于轻度盐化土,开垦 50 a 农田,属于非盐化土(图 1(b))。由此表明,开垦年限的延长有利于土壤洗盐。此结果与罗毅^[18]、周丽等^[17]的研究结果一致。这可能因为长时间的灌溉使得土壤的盐碱向更深层转移。解怀亮等^[5]通过对相同研究区的土壤进行土柱淋溶试验,也证实了土壤可溶性盐随灌溉淋溶表现为逐渐减少的趋势。

在碱性富钙的干旱地区,碳循环的主要途径是通过大气—植被—土壤—水—沉淀作用。越来越多的研究表明干旱区农业排碱排盐的过程伴随着无机碳含量与储量的改变^[5]。主要因为土壤中存在“SOC—CO₂—SIC”微碳循环系统,随着开垦年限的延长,土壤水分状况和 CO₂ 分压发生变化,土壤有机碳和土壤无机碳

发生溶解的逆过程,土壤有机碳分解产生的 CO₂ 有一部分最终转化为沉积性碳酸盐^[19];同时,土壤可以固定大气或土壤中的 CO₂ 合成碳酸盐,重力水淋溶造成表层土壤脱钙,从而使土壤无机碳含量和储量增加。图 2 和图 3 表明,0—60 cm,60—140 cm 和 140—200 cm 土壤无机碳含量具有显著性差异($P<0.05$),土壤无机碳含量随深度增加逐渐增加。据实地调查,研究区新垦农田,会进行漫灌压盐,因而在耕作层致使开垦 0~3 a 的土壤无机碳含量减少(图 3(a))。在 60—140 cm 土层中,开垦 15 a 以上的农田无机碳含量高于荒地、开垦 1,3,5 a 农田,在 140—200 cm 土层,开垦 15 a 以上的农田土壤无机碳含量显著高于荒地的土壤无机碳。这可能是随着开垦年限的延长,土壤有机碳部分被分解成无机碳,且土壤可溶性无机碳被灌溉淋洗致中层或深层土壤,导致深层土壤的无机碳含量和储量增加。

总体上,开垦年限对 0—60 cm 的土壤理化性质和土壤无机碳的影响最为显著(表 2)。其中,开垦年限对理化性质和无机碳的影响作用和影响深度也各不相同。开垦年限对于土壤 pH 值的影响作用主要集中在耕作层;对土壤盐分显著影响深度为 0—140 cm;而在研究深度范围内开垦年限对无机碳都有显著影响。

4 结论

(1)开垦年限的延长有助于干旱区土地耕作层土壤排碱排盐。即长期耕作过程会使耕作层土壤剖层土壤 pH 值降低,140—200 cm 剖层土壤 pH 值增加;同时,使得土壤盐分聚集层逐渐下移,各剖面平均含盐量减少。

(2)干旱区长期耕作会使 0—60 cm 剖层土壤无机碳含量和储量呈现先增加后减少的变化趋势;60—200 cm 无机碳含量和储量逐渐增加。总体上,开垦年限的延长增加了 0—200 cm 土壤无机碳的含量与储量和全碳储量。因而,开垦年限的延长,有助于碳的封存。

(3)开垦年限的延长对土壤 pH 值的显著影响深度为 0—60 cm,对盐分的显著影响深度为 0—140 cm,在 0—200 cm 的研究深度范围内,对无机碳含量与储量都有显著影响。

参考文献:

- [1] 朱永官,李刚,张甘霖,等. 土壤安全:从地球关键带到生态系统服务[J]. 地理学报,2015,70(12):1859-1869.
- [2] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. Science, 2015, 348(6235):1261071.
- [3] Lal R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation[J]. Sustainability, 2015, 7(5):5875-5895.
- [4] 潘根兴,程琨,陆海飞,等. 可持续土壤管理:土壤学服务社会发展的挑战[J]. 中国农业科学,2015,48(23):4607-4620.
- [5] 解怀亮,王玉刚,李彦,等. 灌溉淋溶对土壤有机碳和无机碳及理化性质的影响[J]. 水土保持学报,2014, 28(4):188-193.
- [6] Kindler R, Siemens J, Kaiser K, et al. Dissolved carbon leaching from soil is a crucial component of the net ecosystem carbon balance[J]. Global change biology, 2011, 17(2):1167-1185.
- [7] Li Y, Wang Y G, Houghton R A, et al. Hidden carbon sink beneath desert[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(14):5880-5887.
- [8] 张瑞,曹华,黄传琴,等. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区小流域土壤无机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):143-147.
- [9] 陆晴,王玉刚,李彦,等. 淋溶条件下土地利用方式对土壤有机碳含量及其理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3):242-252.
- [10] 杨黎芳,李贵桐,林启美,等. 栗钙土不同土地利用方式下土壤活性碳酸钙[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 428-432.
- [11] 周丽,王玉刚,李彦,等. 盐碱荒地开垦年限对表层土壤盐分的影响[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2):285-291.
- [12] 牛子儒,王玉刚,邓彩云,等. 耕作对干旱区表层土壤无机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(10):2714-2721.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999.
- [14] 王玉刚,李彦. 灌区间盐分变迁与耕地安全特征:以三工河流域农业绿洲为例[J]. 干旱区地理, 2010, 33(6): 896-902.
- [15] Wang Y H, Zhou G S, Jia B R. Modeling SOC and NPP responses of meadow steppe to different grazing intensities in Northeast China[J]. Ecological Modelling, 2008, 217(1/2):72-78.
- [16] Li J G, Pu L J, Han M F, et al. Soil salinization research in China: Advances and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(5):943-960.
- [17] 周丽,王玉刚,李彦,等. 盐碱荒地开垦年限对表层土壤盐分的影响[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2):285-291.
- [18] 罗毅. 干旱区绿洲滴灌对土壤盐碱化的长期影响[J]. 中国科学, 2014, 44(8):1679-1688.
- [19] 张林. 荒漠草原土壤有机碳向土壤无机碳酸盐转移的定性定量研究[D]. 北京:北京林业大学, 2010.
- [13] 吴秀坤,李永梅,李朝丽,等. 纳版河流域土地利用方式对土壤水稳性团聚体的影响[J]. 土壤学报, 2013, 44(6):1356-1363.
- [14] 孔雨光,张金池,张东海,等. 土地利用变化对土壤及团聚体结合有机碳的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 22(2):131-181.
- [15] 张曼夏,季猛,李伟,等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(4):598-604.
- [16] 谢贤健,张继. 巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):175-179.
- [17] Briedis C, Sá J C D M, Caires E F, et al. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system[J]. Geoderma, 2012, 170(1): 80-88.
- [18] 刘晓利,何园球,李成亮,等. 不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征[J]. 土壤学报, 2008, 45(3):459-465.
- [19] 孙国峰,陈阜,肖小平,等. 轮耕对土壤物理性状及水稻产量影响的初步研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12):109-113.
- [20] 祁迎春,王益权,刘军,等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):340-347.
- [21] 赵世伟,苏静,吴金水,等. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量的变化[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3):114-117.
- [22] 李涵,张鹏,贾志宽,等. 渭北旱源区秸秆覆盖还田对土壤团聚体及碳氮分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2):27-33.

(上接第 253 页)