

# 塔里木盆地南缘新垦农田土壤性状变化及其与小麦产量的关系

黄彩变<sup>1,2</sup>, 严军<sup>3</sup>, 鞠景枫<sup>3</sup>, 岳健<sup>1,2</sup>, 曾凡江<sup>1,2</sup>

(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.新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆 策勒 848300; 3.新疆墨玉县农业技术推广中心, 新疆 墨玉 848100)

**摘要:**以塔里木盆地南缘不同年限新垦农田(10年、20年、30年、40年、50年)为研究对象,以未开垦的荒漠自然土壤为对照,测定0—40 cm土层有机质、养分、盐碱等土壤性状,探讨了新垦农田土壤肥力和盐碱变化及其对小麦产量的影响。结果表明:随开垦年限延长,0—20, 20—40 cm土层有机质含量均呈线性增加,但后者变化幅度相对较小。在0—40 cm土层,全氮、有效氮和速效钾含量随时间延长的变化均与有机质含量呈极显著正相关,开垦50年时分别增加88.8%, 213.4%, 37.5%;有效磷含量在开垦前30年呈线性增加而后又降低,开垦50年时比开垦前增加1 201.2%。荒漠自然土壤(0年)是以 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 为主的轻度盐渍化土壤,开垦为农田后总盐分含量显著下降,且不同年限间差异不明显,在0—40 cm土层平均为0.8 g/kg,离子累积转变为以 $\text{Na}^+$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 为主。土壤pH在开垦30年(pH为8.85)时比开垦前增加13.4%,之后又显著下降,pH变化与 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{K}^+$ 累积呈显著正相关。新垦农田小麦产量平均为4.79 t/hm<sup>2</sup>,与土壤有机质、养分、盐分含量和pH均不相关,但与 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 含量均呈显著负相关。综上,随开垦时间延长绿洲农田土壤肥力和盐渍化程度已得到明显改善,但0—40 cm土层 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 含量却是影响新垦绿洲小麦产量的主要土壤因子。因此,培肥农田土壤,采取有效措施降低 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 含量,并防止其再次升高是实现绿洲小麦稳产高产的关键。

**关键词:** 绿洲新垦农田; 有机质; 土壤养分; 土壤盐分; 小麦产量

**中图分类号:** S158.3; S512.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2020)02-0245-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.02.035

## Dynamic Changes of Soil Properties and Their Relationships with Wheat Yield in the New Reclaimed Farmland in the Southern Tarim Basin

HUANG Caibian<sup>1,2</sup>, YAN Jun<sup>3</sup>, JU Jingfeng<sup>3</sup>, YUE Jian<sup>1,2</sup>, ZENG Fanjiang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011; 2. Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystems, Cele, Xinjiang 848300; 3. Agricultural Technology Extension Centers of Moyu, Moyu, Xinjiang 848100)

**Abstract:** In order to detect the dynamic changes of soil fertility and salt alkali and their effects on wheat yield, the newly reclaimed farmland (10, 20, 30, 40 and 50 years) in the south margin of Tarim Basin were taken as the research object, and the uncultivated desert natural soil was taken as the control, the soil properties, such as organic matter, nutrient and salt alkali of the surface soil (0—40 cm) were measured. The results showed that the organic matter content in the surface soil (0—20 cm and 20—40 cm) increased linearly with the extension of cultivation time, but the change range of organic matter content in 20—40 cm soil layer was relatively small. In the 0—40 cm soil layer, the changes of the total nitrogen, available nitrogen and available potassium content with time extension were all significantly positively correlated with organic matter content, which increased by 88.8%, 213.4 and 37.5% in 50 years of reclamation respectively compared with that of the native desert soil. Available phosphorus content increased linearly in the initial 30 years after cultivation and then decreased. However, it increased by 1 201.2% in 50 years after cultivation compared with the uncultivated soil. The nature desert soil was mildly salinized soil dominated by  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$ . The total salt content decreased sharply after cultivation, and the difference between different years was not obvious, and the average value of which was 0.8 g/kg in 0—40 cm soil layer. The dominate cation and

收稿日期: 2019-08-28

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200406); 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23060302)

第一作者: 黄彩变(1982—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事干旱区植物—土壤间相互关系研究。E-mail: huangcaibian7001@sina.com

通信作者: 黄彩变(1982—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事干旱区植物—土壤间相互关系研究。E-mail: huangcaibian7001@sina.com

anion of the cultivated oasis farmland changed to be  $\text{Na}^+$  and  $\text{HCO}_3^-$ . The pH value increased by 13.4% in the initial 30 years (pH 8.85) compared with the desert soil, and then decreased significantly. The change of pH was positively related with accumulation of  $\text{CO}_3^{2-}$  and  $\text{K}^+$ . The average wheat yield in the new reclaimed farmland was  $4.79 \text{ t/hm}^2$ , and which was negatively related to the content of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$ , but was not related to the content of soil organic matter, nutrients and total salt as well as pH value. In conclusion, continuous cultivation significantly improved soil fertility and salinization degree. However, the wheat yield was closely related with the content of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  in 0—40 cm soil layer. The results suggested that fertilizing oasis farmland soil and taking effective measures to reduce  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  content from rising again were important to achieve stable and high yield of wheat in the study area.

**Keywords:** oasis new reclaimed farmland; organic matter; soil nutrient; soil salinity; wheat yield

近 40 年来塔里木盆地南缘土地利用变化的主要特点是以开垦为主,耕地面积扩增加剧<sup>[1-2]</sup>。土地利用变化势必会引起水、土、气、生过程的一系列改变,特别是由成土作用极其微弱的风沙土转变为农田后,伴随耕作、施肥和灌溉等农业管理措施将显著改变其成土过程。有研究<sup>[3-4]</sup>发现,在荒漠区自然土壤被开垦后的最初几年至十几年土壤有机质及养分含量会出现显著增加趋势,但随开垦年限的延长和耕作管理措施的改变,农田土壤性状的演变进程会出现减缓<sup>[5]</sup>或演变方向发生逆转,甚至引起土壤质量退化<sup>[6]</sup>,这将进一步影响到垦殖农田的生产潜力和作物增产的可持续性<sup>[7]</sup>。因此,研究新垦农田在不同开垦时段土壤性状变化对绿洲土地的合理开发利用和农田可持续管理具有重要意义。

小麦是塔里木盆地南缘重要的粮食作物,但是由于林果业的发展使得小麦产业受到明显冲击,加上老绿洲大面积的果麦间作使小麦产量大幅下降<sup>[8]</sup>。为保障绿洲粮食安全,新垦农田成为当前小麦种植面积扩展的重要来源,但是这些农田大多肥力低下、土壤结构较差并伴随有不同程度盐渍化<sup>[9]</sup>。小麦产量与土壤性状密切相关,在华北平原地区研究<sup>[10]</sup>发现,土壤盐碱度和土壤肥力对小麦产量有显著影响,二者可解释小麦产量 37.5% 的差异;在西北黄土高原地区研究<sup>[11]</sup>表明,土壤有机质和速效磷含量是引起小麦产量变异的主要因素;在华东地区<sup>[12]</sup>则发现,土壤有机质每提高 0.1%,可使小麦产量提高  $666 \text{ kg/hm}^2$ ;全氮每提高 0.01%,可使产量提高  $795 \text{ kg/hm}^2$ 。可以看出在不同区域影响小麦生产的主要土壤性状也各异。

在河西边缘绿洲<sup>[3]</sup>、新疆玛河流域绿洲<sup>[6]</sup>、准噶尔盆地西北缘绿洲<sup>[9]</sup>对新垦农田的研究发现,土壤肥力和盐碱化短期内在各种农业管理措施的作用下均朝着正向发展。这在塔里木盆地南缘新垦绿洲农田<sup>[13]</sup>也有类似发现,而且农田土壤碳氮营养增加对玉米生产有显著的正效应,但对棉花产量影响却不明显。那么随着绿洲农田土壤性状的变化是否也会影

响到小麦生产? 若会,其主要土壤影响因子有哪些,目前还鲜有报道。为此,本研究以塔里木盆地南缘不同年限的新垦绿洲农田为研究对象,分析了不同年限农田土壤有机质、养分、盐碱含量等土壤性状变化特征,并探讨了新垦农田土壤性状变化与小麦产量的关系,以期查明在当前耕作管理制度下限制新垦农田小麦产量潜力发挥的主要土壤因子,为研究区域新垦农田土壤培肥和小麦增产增效提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

研究地位于塔里木盆地南缘墨玉绿洲北部的喀尔赛镇( $37^{\circ}23'—37^{\circ}34' \text{N}$ ,  $79^{\circ}33'—79^{\circ}40' \text{E}$ ),该镇北部毗邻塔克拉玛干沙漠,地势较平坦,海拔 1 298~1 305 m,属暖温带极端干旱区。年平均气温  $11.4^{\circ}\text{C}$ ,年最高日平均气温  $31.5^{\circ}\text{C}$ ,年最低日平均气温  $-8.2^{\circ}\text{C}$ 。年均降水量仅为 34.7 mm,年均蒸发量达 2 239 mm,无霜期平均为 266 d,年日照时间为 2 591.2 h,日照百分率 54.9%。昼夜温差大,春季多大风,浮尘日数多,并常伴有沙尘暴。耕地面积约占土地总面积的 1.0%,人均占有耕地  $0.11 \text{ hm}^2$ ,人多地少的矛盾十分突出。与沙漠接壤的绿洲—沙漠过渡带是近 50 年来的主要垦荒区,土壤类型为盐化风沙土,自然植被以芦苇(*Phragmites australis*)为主,伴生有少量的骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)和花花柴(*Karelinia capsica*)等。在不同时段均有沙地被平整开垦,因此形成不同开垦时间序列的耕作农田,主要依赖地下水和夏季洪水灌溉。新垦农田主要种植制种苜蓿或棉花,大概 10 年开始种植冬小麦和夏玉米,不定时与棉花倒茬种植。

### 1.2 采样方法

于 2016 年 5 月底开始在冬小麦收获期对喀尔赛镇的垦荒农田进行实地调查和采样。根据作物耕作历史、村委会的土地利用记载及当地居民提供的信息确定农田开垦时间,选取绿洲边缘 5 个不同开垦年限的农田即 10 年(10 a)、20 年(10 a)、30 年(30 a)、40

年(40 a)、50 年(50 a)和未开垦的荒漠土壤(0 a)作为对照。所选取的农田样点均由背景相似的荒漠土壤开垦而来,近几年来同种作物的管理方式也相近。选取的农田当年均种植小麦,小麦品种为“新冬 20”。农户小麦肥料种类与用量差异不大,每年投入的化肥用量为 N 309 kg/hm<sup>2</sup>和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 172.5 kg/hm<sup>2</sup>,化肥种类为磷酸二铵和尿素,分别在播种期(9 月下旬)、冬前分蘖期(11 月中旬)、返青期(3 月上旬)、拔节期(4 月初)、抽穗期(5 月初)和灌浆期(5 月中旬)大水漫灌 1 次。

每个开垦时段分别选取开垦历史、种植和管理方式相近的 3 户农田,且最近 2 年连续种植小麦,每户农田为 1 个重复,农田面积至少 0.5 hm<sup>2</sup>,同时选取农田周围 3 个不同位置未开垦的荒漠土壤为对照(0 年)。每个样地选 3 个取样点,取样层次为 0—20, 20—40 cm,相同土层混匀后用“四分法”取约 500 g 土样装入塑料袋内带回。剔除植物根系及石砾等杂物,待土样自然风干后充分研磨过 1 mm 筛,用于土壤养分和盐分指标的测定。6 月中旬调查对应土壤取样点的农田小麦产量,根据农户实际收获产量和农田面积计算每公顷小麦产量。

1.3 测定方法

相关土壤指标测定参考鲍士旦<sup>[14]</sup>的《土壤农化分析》,土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定,土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定,土壤有效氮含量采用碱解蒸馏法测定,有效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比法测定,速效钾含量采用醋酸铵浸提—火焰光度法测定,土壤 pH 采用 pH S—2C 型 pH 计测定。总盐含量采用干渣法测定,离子组成的具体测定方法为:CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>采用双指示剂中和法测定,Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>采用 EDTA 络合滴定法测定,Cl<sup>-</sup>采用 AgNO<sub>3</sub> 滴定法测定,Na<sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>采用火焰光度法测定,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>采用 EDTA 间接滴定法测定。

1.4 数据分析与处理

所有数据采用 Excel 2010 进行处理,采用 SPSS 16 软件进行不同开垦时间序列土壤性状的单因子方差分析(ANOVA),LSD 法显著性检验以及部分变量之间的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同利用年限农田小麦产量差异

新垦农田小麦产量平均为 4.79 t/hm<sup>2</sup>,随开垦年限延长未表现出规律性变化(图 1)。开垦前 30 a 小麦产量差异不明显,在开垦 40 a 时小麦产量最高,但与 20 a 差异不明显,二者均显著高于 50 a 农田。这表明小麦产量与垦殖农田利用强度无明显相关性,开垦年限不是小麦产量的主要影响因素。

2.2 不同开垦年限农田土壤养分变化及其与小麦产量的关系

在 0—20 cm 土层,有机质含量随开垦年限延长而增加,与荒漠土壤相比,在开垦前 20 a 增加 320.8%;20 a 之后增加速度减缓,40 a 时又开始显著增加,至开垦 50 a 时增加 775.3%(图 1)。土壤全氮含量在前 30 a 差异不显著,在 40 a 时显著增加 94.6%,之后变化不明显。有效氮含量在前 10 a 显著增加 401.6%,之后变化不明显,在 50 a 时增加 666.3%。有效磷含量在前 30 a 也呈线性增加,之后呈先降低后又增加的趋势,在 50 a 时增加 1 907.8%。土壤速效钾含量在前 40 a 变化不明显,50 a 时显著增加了 77.7%。

在 20—40 cm 土层,荒漠土壤开垦后除速效钾含量变化不明显外,土壤有机质和其他养分含量均有不同程度的提升。有机质和有效氮含量均在 50 a 时最高,与开垦前相比分别增加 522.4%和 110.1%。全氮和有效磷含量分别在开垦 40 a 和 30 a 时最高,分别增加 56.5%和 910.4%。总体来看,0—20 cm 土层土壤养分的变化幅度明显高于 20—40 cm 土层,且总体呈正向变化趋势。

相关性分析(表 1)表明,土壤有机质、全氮、有效氮和速效钾之间均呈极显著正相关( $P<0.01$ ),有效磷仅与速效钾成显著正相关( $P<0.05$ )。土壤有机质和各养分含量均与小麦产量无明显相关性。

表 1 0—40 cm 土层养分与产量间相关性分析

项目	有机质	全氮	有效氮	有效磷	速效钾
全氮	0.930**				
有效氮	0.901**	0.779**			
有效磷	0.248	0.235	0.261		
速效钾	0.760**	0.728**	0.772**	0.543*	
产量	-0.174	-0.068	-0.383	-0.188	-0.442

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。

2.3 不同开垦年限农田土壤盐碱含量变化

荒漠土壤开垦为农田后,0—20 cm 土层 pH 呈增加趋势,在开垦 30 a 达到最高,与开垦前相比增加 13.4%,但与 20 a 农田差异不显著;30 a 之后又显著下降,但仍明显高于荒漠土壤(图 2)。20—40 cm 土层 pH 的变化趋势与表层土(0—20 cm)一致,且在不同年限农田均略高于表层土壤。根据土壤酸碱性分类(7.5<pH≤8.5 为碱性土,pH>8.5 为强碱性土)可知,荒漠土壤垦殖前后均属于碱性土壤,且在 20~30 a 成强碱性土。

自然条件下的荒漠土壤盐分含量明显较高,且 20—40 cm 土层明显高于 0—20 cm 土层。开垦前 10 a,0—20,20—40 cm 土层盐分含量分别下降 38.1%和 81.2%;之后随开垦年限延长土壤盐分含量变化不

明显。根据新疆盐碱化的分级标准(土壤盐分 $<3\text{ g/kg}$  为 非 盐 化 土, $3\text{—}6\text{ g/kg}$  为 轻 盐 化 土)可知,荒漠

土壤表层为非盐化土,在  $20\text{—}40\text{ cm}$  土层为轻盐化土,开垦为农田后为非盐化土。

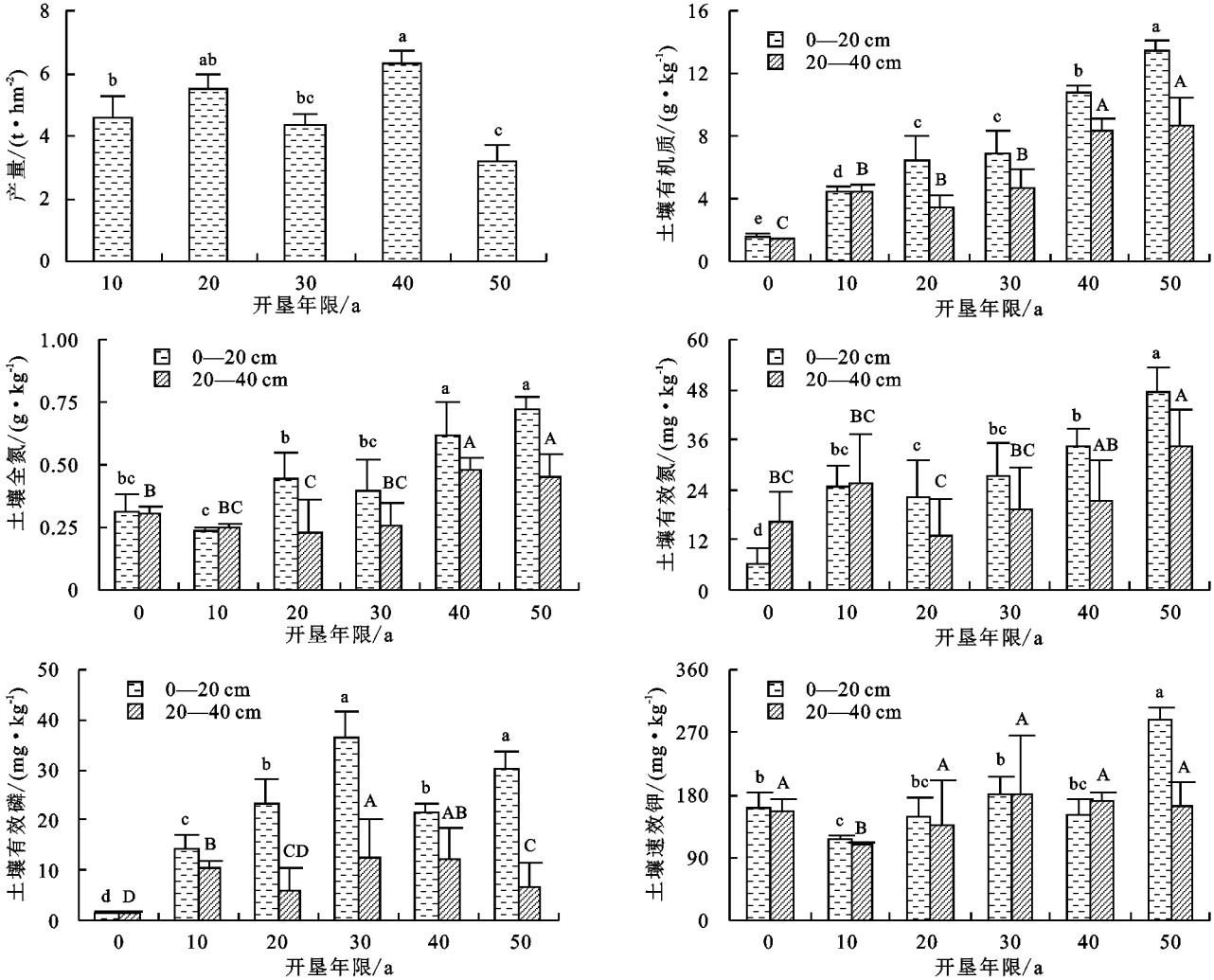


图 1 绿洲不同垦殖年限农田土壤养分含量和小麦产量差异

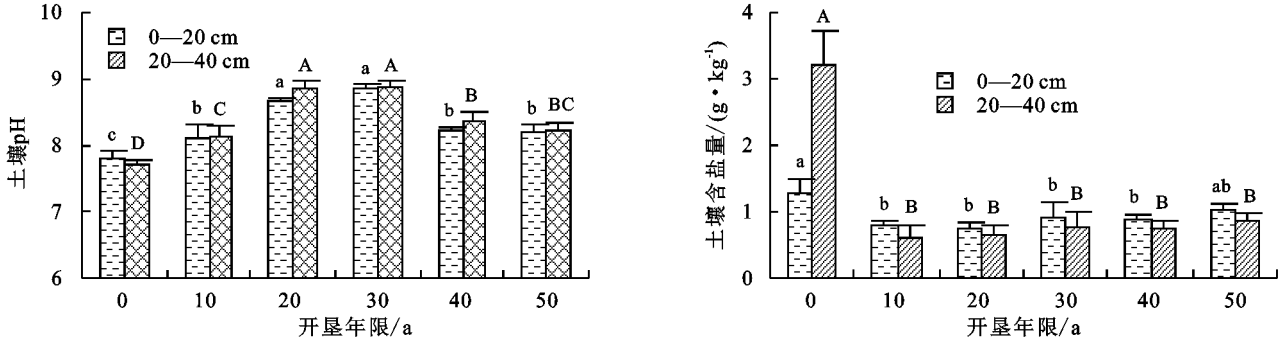


图 2 绿洲不同垦殖年限农田土壤 pH 和总盐分含量变化

2.4 不同开垦年限农田土壤盐基离子含量变化

荒漠土壤在  $0\text{—}20\text{ cm}$  土层,阴离子含量最高为  $\text{SO}_4^{2-}$ ,其次为  $\text{Cl}^-$  和  $\text{HCO}_3^-$ ,不含  $\text{CO}_3^{2-}$ 。开垦为农田后, $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  显著下降, $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  显著增加。在  $30\text{ a}$  时  $\text{Cl}^-$  含量最低,但与  $10, 20\text{ a}$  和  $30\text{ a}$  差异不明显。 $\text{SO}_4^{2-}$  含量在  $20\text{ a}$  时显著低于其他农田,之后又出现上升,但仍低于开垦前含量。除  $20, 30\text{ a}$  农田外,其他农田几乎不含  $\text{CO}_3^{2-}$ 。 $\text{HCO}_3^-$  在  $50\text{ a}$  年农田最高,但与  $30\text{ a}, 40\text{ a}$  差异不明显。

$\text{HCO}_3^-$  在垦殖  $10\text{—}50\text{ a}$  可分别占到阴离子总量的  $41.6\%, 62.8\%, 56.0\%, 53.4\%$  和  $51.8\%$ ,是开垦农田土壤聚集的主要阴离子。

在  $0\text{—}20\text{ cm}$  土层,荒漠土壤阳离子主要以  $\text{Na}^+$  为主,其次为  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  含量比较低。开垦后该土层  $\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  显著下降,  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  呈波动增加趋势。 $\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  均在  $20\text{ a}$  时降至最低,除显著低于  $50\text{ a}$  和  $40\text{ a}$  农田外,与其他年限农田差异均不明显。 $\text{Mg}^{2+}$  在  $40\text{ a}$  时含量最高,与  $10, 20, 50\text{ a}$

差异不明显。 $K^+$ 含量在 30 a 时含量最高,与 50 a 时含量差异也不明显。 $Na^+$ 在垦殖后 10~50 a 分别占到总阳离子含量的 51.1%,42.3%,41.4%,39.7%和

48.6%,其次是  $Ca^{2+}$ ,平均可占到总阳离子含量的 23.9%。可见,垦殖后农田阳离子累积以  $Na^+$  为主(图 3)。

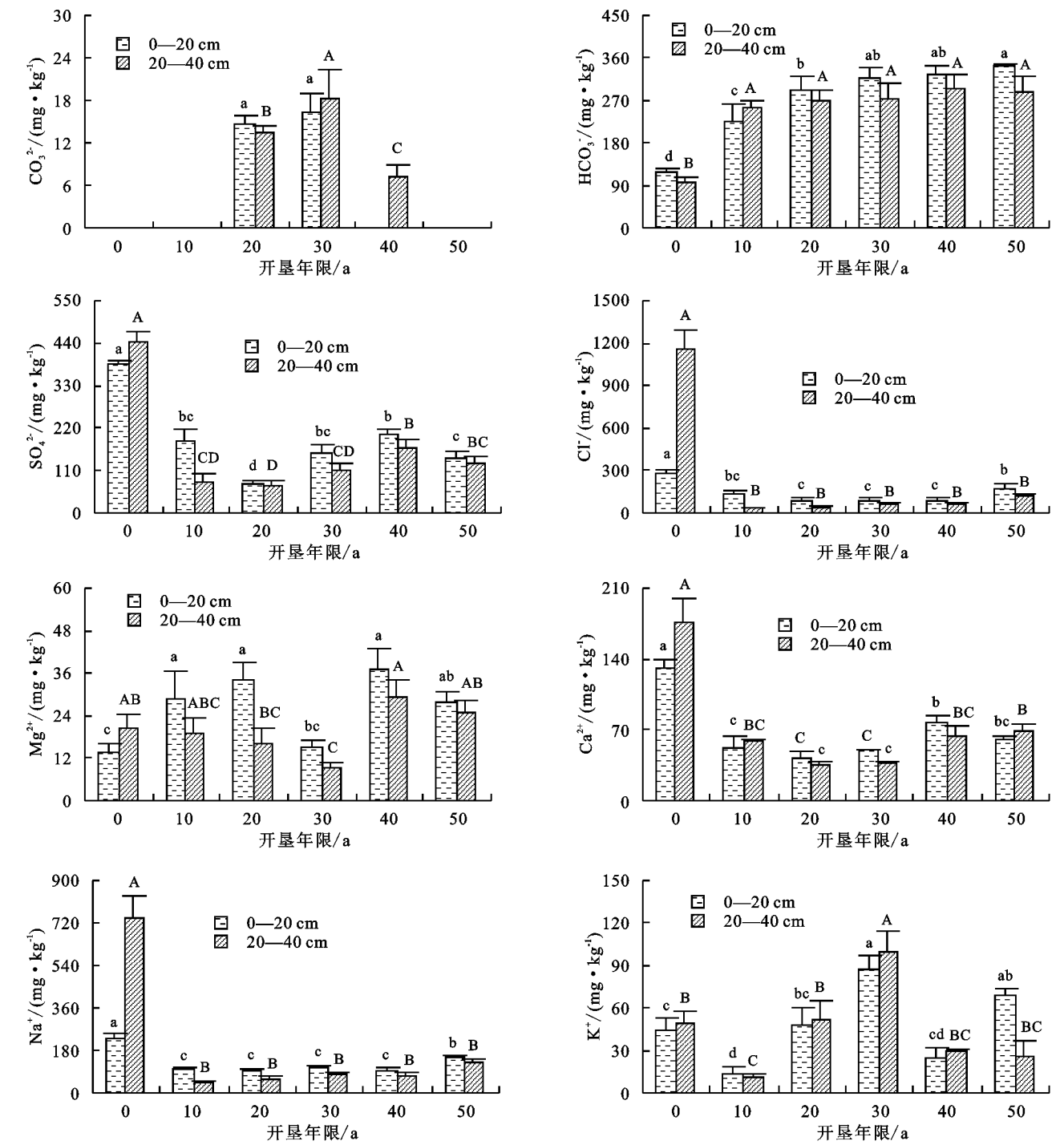


图 3 绿洲不同垦殖年限农田土壤盐基离子含量变化

在 20—40 cm 土层,荒漠土壤阴离子含量最高为  $Cl^-$ ,可占到阴离子总量的 68.1%,其次为  $SO_4^{2-}$ ,且二者含量显著高于表层土(0—20 cm)阴离子含量;阳离子主要以  $Na^+$  为主,可占到总阳离子含量的 75.2%,也明显高于表层土壤阳离子含量。新垦农田阴离子含量的变化趋势均与表层土壤一致, $HCO_3^-$  显著增加,随开垦年限延长一直保持较高的累积量,此外,在开垦 10~30 a 期间  $CO_3^{2-}$  也开始累积; $Cl^-$

和  $SO_4^{2-}$  与表层土壤一样,也出现显著下降。垦殖农田的阳离子变化趋势也与表层土壤一致, $Na^+$  和  $Ca^{2+}$  出现大幅度下降, $Mg^{2+}$  波动性增加,而  $K^+$  含量呈先上升后下降的趋势。阴离子主要以  $HCO_3^-$  为主,垦殖 10~50 a 可分别占到阴离子总量的 69.5%,68.3%,59.0%,55.8%和 53.6%;阳离子中  $Na^+$  所占比例最高,不同年份分别为 51.1%,42.3%,41.1%,39.7%,48.6%。

## 2.5 不同开垦年限农田土壤盐碱含量与小麦产量的关系

从表 2 相关性分析发现,土壤 pH 与  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{K}^+$  呈极显著正相关关系,尤其是  $\text{CO}_3^{2-}$ ,相关系数为 0.949;与  $\text{Ca}^{2+}$  呈极显著负相关,与  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Cl}^-$  呈显著负相关。土壤总盐分含量与  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Na}^+$  呈极显著正相关,与  $\text{Cl}^-$  呈显著正相关。离子间的相关

性表明,土壤  $\text{CO}_3^{2-}$  与  $\text{K}^+$  呈极显著正相关,与  $\text{Ca}^{2+}$  呈极显著负相关,与  $\text{Mg}^{2+}$  显著负相关; $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  呈极显著正相关; $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{K}^+$  呈极显著负相关; $\text{Na}^+$  与  $\text{Cl}^-$  呈极显著正相关,与  $\text{HCO}_3^-$  呈显著正相关。绿洲新垦农田小麦产量与土壤 pH 及总盐分含量无明显相关性,但与  $\text{Na}^+$  及  $\text{Cl}^-$  含量均呈显著负相关。

表 2 0—40 cm 土壤盐分离子及产量间相关性分析

项目	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	pH	总盐分
$\text{HCO}_3^-$	0.115									
$\text{Cl}^-$	-0.513	0.234								
$\text{SO}_4^{2-}$	-0.413	0.374	0.169							
$\text{Ca}^{2+}$	-0.753**	0.363	0.492	0.809**						
$\text{Mg}^{2+}$	-0.582*	0.234	0.144	0.369	0.649**					
$\text{Na}^+$	-0.256	0.554*	0.882**	0.204	0.403	0.012				
$\text{K}^+$	0.781**	0.413	-0.039	-0.183	-0.438	-0.673**	0.288			
pH	0.949**	0.173	-0.523*	-0.426	-0.752**	-0.539*	-0.197	0.739**		
总盐分	-0.017	0.715**	0.575*	0.485	0.400	0.081	0.748**	0.391	-0.033	
产量	0.163	0.053	-0.625*	0.223	0.066	0.471	-0.626*	-0.266	0.132	-0.221

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。

## 3 讨论

### 3.1 土壤有机质和养分随开垦年限延长的变化

鉴于有机质在土壤各种功能中的作用和重要性,其在所有土壤质量的化学评价指标中占据主导地位<sup>[15]</sup>,常被用来反映土地利用变化后土壤质量的阶段性变化趋势。本研究发现,荒漠土壤在未开垦前其有机质含量极低,开垦为农田后在耕层土壤呈线性增加,但在开垦 20~30 a 期间处于平稳状态,之后又迅速增加,这在甘肃河西走廊新垦绿洲农田的研究<sup>[5]</sup>中也有类似发现。新垦绿洲农田多由土壤结构极差、肥力极低的荒漠土壤转变而来,因灌溉、施肥和有机肥投入使有机胶结物质的输入增加,同时地上凋落物和土壤残留根系数量也大幅提升,使得开垦早期农田有机质含量显著提升。绿洲相对单一的农业耕作管理措施使得农田土壤生物和理化特性在开垦后某个时段内处于一个相对稳定的状态<sup>[5]</sup>,有机物的投入和输出之间也达到相对平衡<sup>[16]</sup>,相应地土壤有机质也保持在相对稳定水平。在开垦 30~50 a 期间又出现快速提升,有研究<sup>[17]</sup>认为,这与长期地表水漫灌所携带的细粒物质不断累积有关,该过程虽然缓慢,但却有利于土壤结构形成以及土壤有机质和养分的保持。总体来看,开垦 20~30 a 期间是新垦农田土壤发育过程的一个转折期,若利用不当可能会出现土壤质量的退化<sup>[6]</sup>,为此,有研究<sup>[3]</sup>提出,从荒漠土壤转变为可持续利用的农业土壤至少需要 50 年,但在本研究区域还需进一步验证。

一般情况下,随着有机质含量的增加,土壤中有

效性氮、磷、钾也随之增加<sup>[18]</sup>。本研究发现,土壤全氮、有效氮和速效钾含量与有机质含量均呈极显著正相关,多年开垦后均显著增加,有效磷含量与有机质含量却无明显相关性。荒漠土壤自身钾含量比较丰富,其他营养元素氮、磷主要来自于有机质的分解,垦殖前 20 a 土壤中氮、磷养分不断积累可能与大量氮磷肥的施用有关。但在开垦 30 a 后土壤有效磷含量显著下降,在 50 a 时又有明显回升,这可能是由于小麦产量相应地先显著提升而后又明显下降(图 1),因此对磷的吸收和消耗量也出现相同的变化趋势有关。

### 3.2 土壤盐碱随开垦年限延长的变化

土壤含盐量是评价其盐渍化程度的重要指标,由多种可溶性盐基离子组成。绿洲不同土地利用类型其土壤盐基离子组成差异显著<sup>[19]</sup>,相应地直接影响土壤排盐的难易程度<sup>[20]</sup>。本研究表明,荒漠自然土壤含盐量较高,在 20—40 cm 土层聚集现象最明显,盐分离子累积主要以  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  为主,属于轻度盐渍化土壤。开垦为农田后,土壤盐分含量显著下降,但在开垦 20 a 后略有上升,离子累积以  $\text{Na}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  为主,属于非盐渍化土壤。荒漠自然土壤开垦后可在一定程度上降低土壤的盐分累积,这与在新疆—渭库绿洲<sup>[21]</sup>和黄河三角洲地区<sup>[22]</sup>的研究一致。本研究中,绿洲农田开垦前后土壤盐分累积量与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$  含量呈极显著正相关,与  $\text{Cl}^-$  呈显著正相关。农田盐分含量下降主要与当地普遍采用大水漫灌制度有关,绿洲土壤水分在 0—60 cm 土层中运移强烈<sup>[23]</sup>,盐分离子尤其是  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  随水向下淋洗,从

而使上层土壤盐分含量剧烈下降,下降到一定水平后维持不变,可能与  $\text{HCO}_3^-$  累积有关(图 2)。

pH 是评价土壤酸碱性、判断土壤是否出现碱化以及碱化程度的重要指标<sup>[24]</sup>,除了受到土壤母质、生物、气候等因子影响外,还与人为活动(如耕作、施肥、种植、灌溉等)以及盐基离子饱和度等密切相关。本研究表明,开垦前的自然土壤呈弱碱性,开垦为农田后 pH 显著上升,在开垦 20,30 a 甚至超过 8.5,呈强碱性,但在 30 a 后又下降为弱碱性( $7.5 < \text{pH} \leq 8.5$ )。农田土壤 pH 增加与  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{K}^+$  累积变化呈极显著正相关(表 2),此外,还与垦殖后土壤  $\text{HCO}_3^-$  大量累积有关。 $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  是弱碱性盐,其含量的增加可反映出土壤碱化程度的加重<sup>[25]</sup>。研究区荒漠土壤几乎不含  $\text{CO}_3^{2-}$ ,但在转换为农田后其水热条件明显改善,土壤有机碳和根系生物量均随着开垦年限延长而增加<sup>[5]</sup>,根及根际微生物呼吸释放的  $\text{CO}_2$  也会随之增加,从而加速碳酸盐的形成<sup>[26]</sup>,这也可能是开垦 20,30 a 农田  $\text{CO}_3^{2-}$  显著增加的主要原因。开垦 30 a 土壤 pH 又出现下降,可能与土壤溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  含量的增加(图 3),进而形成碳酸盐的沉淀有关。综合来看,荒漠土壤开垦后主要从以 NaCl 为主的弱碱性盐渍化土朝向以  $\text{NaHCO}_3$  为主的碱土方向发展。

### 3.3 小麦产量与土壤肥力及盐碱含量的关系

土壤肥力(土壤有机质和各种养分的供应)对小麦产量影响显著,如在潮土区对小麦产量的贡献可达 51.4%<sup>[27]</sup>。在我国西北干旱区,土壤肥力与小麦产量密切相关,其中耕层土壤有机质和速效磷含量与小麦产量呈显著正相关<sup>[11]</sup>。本研究表明,新垦绿洲农田小麦平均产量为 4.79 t/hm<sup>2</sup>,略高于全国平均水平(4.71 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[28]</sup>,但小麦产量与土壤有机质、全氮、有效氮、有效磷和速效钾均无明显相关性,说明在当前生产条件下,小麦产量不受土壤肥力因素的影响。根据新疆土壤养分含量分级标准<sup>[29]</sup>,绿洲农田有机质和有效氮含量均处于低级水平,有效磷和速效钾均属中低等水平。这表明绿洲新垦农田在垦殖过程中肥力水平虽然有明显上升,但仍处于相对较低水平<sup>[3]</sup>。土壤有机质和养分供给对小麦生产的贡献不明显,说明目前绿洲小麦产量提高还主要依赖于大量化肥投入。因此,要进一步加强绿洲农田有机培肥,提升土壤有机质含量和养分供给水平,将有利于提高土壤地力对小麦生产的贡献,进而降低小麦对化肥的依赖。

土壤盐碱化是限制小麦生产的重要限制因素<sup>[30]</sup>,但有报道<sup>[31-32]</sup>认为,碱胁迫比盐胁迫的伤害更大。本研究表明,小麦产量与土壤总盐含量和 pH 均无明显相关性。谢文军等<sup>[33]</sup>研究表明,土壤含盐量超过 3.5 g/kg 时小麦产量大幅下降,3.1 g/kg 应为

小麦生产的安全临界值。本研究中,农田土壤总盐含量远低于该临界值,属于非盐化土壤,所以土壤含盐量不是研究区域小麦生产的限制因素。pH 对土壤养分有效性和植物生长也有显著影响<sup>[34-35]</sup>,大多数植物在土壤 pH 大于 9.0 时难以存活。本研究中,农田在开垦 20,30 a 时耕层 pH(8.5~8.8)虽然显著高于其他农田,但  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量相对较低,其小麦产量属于中等水平;40 a 农田的 pH 下降为弱碱性, $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量也最低(173 mg/kg),其小麦产量最高;至开垦 50 a 时,虽然其 pH 也相对较低,但  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量却最高(324 mg/kg),相应地小麦产量也显著低于其他农田。由此可见,新垦农田土壤 pH 均小于 9.0 并未对小麦生产有明显抑制作用,但  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量高底却对小麦产量的影响却十分显著。因此,在当前生产条件下, $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量是绿洲小麦生产中主要的土壤限制因子,如何采取有效措施降低其在土壤中累积,并防止其再次升高是增加小麦产量的关键。

## 4 结论

(1)在塔里木盆地南缘荒漠土壤开垦为农田后,随开垦年限延长,0—40 cm 土层有机质含量呈线性上升趋势,在开垦 50 a 时增加 655.2%;土壤全氮、有效氮和速效钾含量变化与有机质含量呈显著正相关,分别在开垦后 50 a 增加 88.8%,213.4%和 37.5%;土壤有效磷含量总体也呈上升趋势,在开垦 50 a 时增加 1 201.2%。

(2)荒漠土壤属于以  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  为主的弱碱性盐渍化土,开垦后土壤盐分含量显著下降,开垦前 10 a 下降 69.0%,之后随开垦年限延长并未有明显变化。新垦农田盐基离子累积转变为以  $\text{Na}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  为主,属于碱性土壤。土壤 pH 在开垦 30 a 时比未开垦前( $\text{pH}=7.76$ )增加 13.4%,之后又显著下降,pH 变化与  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{K}^+$  累积呈显著正相关。

(3)新垦农田的土壤养分、盐分含量和 pH 变化对小麦产量均无明显影响,但土壤  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量变化与小麦产量显著负相关。因此,培肥农田土壤,采取有效措施降低  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量并防止其再次升高,对绿洲小麦稳产高产具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 贺可,吴世新,杨怡,等.近 40 a 新疆土地利用及其绿洲动态变化[J].干旱区地理,2018,41(6):1333-1340.
- [2] 董弟文,阿布都热合曼·哈力克,王大伟,等.1994—2016 年和田绿洲植被覆盖时空变化分析[J].生态学报,2019,39(10):3710-3719.
- [3] Su Y Z, Yang R, Liu W J, et al. Evolution of soil structure and fertility after conversion of native sandy desert soil to irrigated cropland in arid region, China[J]. Soil Science,2010,175:246-254.

- [4] Yang R, Su Y Z, Wang T, et al. Effects of chemical and organic fertilization on soil carbon and nitrogen accumulation in a newly cultivated farmland[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(3): 658-666.
- [5] 苏永中, 张珂, 刘婷娜, 等. 河西边缘绿洲荒漠沙地开垦后土壤性状演变及土壤碳积累研究[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(9): 1646-1654.
- [6] 张风华, 潘旭东, 李玉义. 新疆玛河流域绿洲农田开垦后土壤环境演变分析[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(2): 331-336.
- [7] Beretta-Blanco A, Pérez O, Carrasco-Letelier L. Soil quality decrease over 13 years of agricultural production[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2019, 114: 45-55.
- [8] 段志平, 刘天煜, 张永强, 等. 离树间距对枣麦间作小麦光合特性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(11): 1445-1452.
- [9] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红, 等. 准噶尔盆地西北缘新垦绿洲土地利用对土壤养分变化的影响[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 94-100.
- [10] 陈健, 王忠义, 李良涛, 等. 基于比较优势分析法的冬小麦产量差异[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1971-1976.
- [11] 马小龙, 余旭, 王朝辉, 等. 旱地小麦产量差异与栽培、施肥及主要土壤肥力因素的关系[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(24): 4757-4771.
- [12] 陈秀德, 王洪征, 黄孝新, 等. 土壤养分含量及施肥与小麦产量关系的研究[J]. *山东农业科学*, 1999(4): 33-34.
- [13] 黄彩变, 曾凡江, 雷加强, 等. 开垦对绿洲农田碳氮累积及其与作物产量关系的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5113-5120.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Mbuthia L W, Acosta-Martinez V, De Bruyn J, et al. Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 89: 24-34.
- [16] 唐光木, 徐万里, 盛建东, 等. 新疆绿洲农田不同开垦年限土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳变化[J]. *土壤学报*, 2010, 47(2): 279-285.
- [17] Li X G, Li F M, Rengel Z, et al. Cultivation effects on temporal changes of organic carbon and aggregate stability in desert soils of Hexi Corridor Region in China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 91(1/2): 22-29.
- [18] 孔君洽, 杜泽玉, 杨荣, 等. 荒漠绿洲农田垦殖过程中耕层土壤碳储量演变特征[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 180-188.
- [19] 王丹丹, 于志同, 程猛, 等. 渭干河绿洲不同土地利用类型土壤盐分的变化特征分析[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(2): 349-357.
- [20] 王巧焕, 卢玉东, 赛佳美, 等. 干旱区绿洲土壤盐分特征[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(3): 503-509.
- [21] 王雪梅, 康璇, 赵枫. 不同土地利用方式下渭—库绿洲土壤盐渍化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 160-164.
- [22] 邹晓霞, 王维华, 王建林, 等. 垦殖与自然条件下黄河三角洲土壤盐分的时空演化特征研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 309-316.
- [23] 吕真真, 刘广明, 杨劲松. 新疆玛纳斯河流域土壤盐分特征研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 289-295.
- [24] 赵秀芳, 杨劲松, 姚荣江. 基于典范对应分析的苏北滩涂土壤春季盐渍化特征研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 422-428.
- [25] 张鹏锐, 李旭霖, 崔德杰, 等. 滨海重盐碱地不同土地利用方式的水盐特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 117-203.
- [26] Schwartzman D W, Shore S N, Volk T, et al. Self-organization of the earth's biosphere or geochemical or geophysiological? [J]. *Origins of Life and Evolution of Biosphere*, 1994, 24(5): 435-450.
- [27] 马常宝, 卢昌艾, 任意, 等. 土壤地力和长期施肥对潮土区小麦和玉米产量演变趋势的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 796-802.
- [28] 马文奇, 张福锁, 张卫锋. 关乎我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业[J]. *资源科学*, 2005, 27(3): 33-40.
- [29] 张炎, 毛端明, 王讲利. 新疆棉花平衡施肥技术的发展现状[J]. *土壤肥料*, 2003(4): 7-10, 23.
- [30] 陈德明, 俞仁培, 杨劲松. 盐渍条件下小麦抗盐性的隶属函数值法评价[J]. *土壤学报*, 2002, 39(3): 368-374.
- [31] Yang C W, Wang P, Li C Y, et al. Comparison of effects of salt and alkali stresses on the growth and photosynthesis of wheat[J]. *Photosynthetica*, 2008, 46(1): 107-114.
- [32] Li X Y, Liu J J, Zhang Y T, et al. Physiological responses and adaptive strategies of wheat seedlings to salt and alkali stresses[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55: 680-684.
- [33] 谢文军, 张衍鹏, 张森, 等. 滨海盐渍化土壤理化性质与小麦生产间的关系[J]. *土壤学报*, 2015, 52(2): 461-466.
- [34] 徐开杰, 史丽丽, 王勇锋, 等. 水培条件下 pH 值对柳枝稷幼苗生长发育的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(23): 7690-7698.
- [35] 岳小红, 曹靖, 耿杰, 等. 盐分胁迫对啤酒大麦幼苗生长、离子平衡和根际 pH 变化的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 7373-7380.