

景电灌区盐碱耕地土壤剖面盐分时空演替特征研究

王荣荣¹,徐存东^{1,2},刘 辉³,张 锐¹,程 慧⁴,王 燕¹

(1.华北水利水电大学水利学院,河南 郑州 450046;2.水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心,河南 郑州 450046;
3.河南天池抽水蓄能有限公司,河南 南阳 473000;4.中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘 要:为了研究西北干旱引黄灌区长期综合改良条件下盐碱耕地土壤化学性质的时空演替特征,以甘肃省景泰川电力提灌灌区(以下称“景电灌区”)为例,采集灌区不同耕种年限(5、10、15 a)盐碱耕地 0~80 cm 土层土壤样品,同时选取试验地附近未耕作盐碱荒地作为对照。对土壤水溶性总盐(TS)、pH 值和各盐分离子指标进行测定与分析,研究了不同耕种年限盐碱耕地土壤剖面盐分的时空演替特征。结果表明,随着耕种年限的增加盐碱耕地土壤脱盐效果明显,土壤 TS 由未耕种时的 4.081 g·kg⁻¹下降到耕种 15 a 后的 0.411 g·kg⁻¹;而土壤 pH 值则随着耕种年限的增加呈现出缓慢增加趋势,由未耕种时的 8.30 上升至耕种 15 a 后的 9.05,说明土壤在脱盐过程中出现了碱化趋势;其余盐分指标除 HCO₃⁻ 随着耕种年限的增加呈现缓慢增加趋势,钠吸附比(SAR)、Cl⁻/SO₄²⁻ 以及其余各盐分离子均随着耕种年限的增加而降低。可见随着耕种年限的增加,土壤条件得到了很大的改善,有利于作物的生长,但长期的土壤脱盐改造同时也诱发了土壤碱化倾向。

关键词:盐碱耕地;耕种年限;盐分特征;景电灌区

中图分类号:S156.4 **文献标志码:**A

Spatio-temporal succession characteristics of saline-alkali soil
profile salt in Jingdian Irrigation District

WANG Rong-rong¹, XU Cun-dong^{1, 2}, LIU Hui³, ZHANG Rui¹, CHENG Hui⁴, WANG Yan¹

(1. College of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China;
2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Protection Engineering, Zhengzhou, Henan 450046, China;
3. Henan Tianchi Pumping and Energy Storage Co., Ltd., Nanyang, Henan 473000, China;
4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Over a long-term comprehensive improvement of the saline-alkali land in the arid Yellow River Irrigation Districts in northwest China, the soil chemical properties have been changing temporally and spatially. The Jingtaichuan Electric Irrigation District (hereinafter referred to as “Jingdian Irrigation District”) was taken as the typical study area. The soil samples were collected from 0~80 cm layers of the selected areas on different cultivation years (5, 10, 15 a), and an uncultivated saline-alkali wasteland near the test site was selected as a control. The total soluble salts (TS), pH, and various salt ions were measured and analyzed to explore the spatio-temporal differentiation of salt in the saline-alkali soil profile. The results showed that with the extension of cultivation years, the salinity of soil profile was significantly decreasing that the TS of soil profile reduced from 4.081 g·kg⁻¹ to 0.411 g·kg⁻¹ with the 15a, while the pH was slowly increasing from 8.30 to 9.05 during the period. The concentration of HCO₃⁻ did not change much and the values of other salt ions and SAR, Cl⁻/SO₄²⁻ were decreasing. It indicated that with the extension of cultivation years, the soil conditions had been greatly improved, which is beneficial to the

收稿日期:2018-04-26 修回日期:2019-04-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51579102,31360204);河南省科技厅科技创新人才支持计划(174200510020);河南省高校创新团队支持计划(19IRTSTHN030);宁夏回族自治区水利科技专项项目(TYZB-ZFGG-2017-31);华北水利水电大学博士研究生创新基金
作者简介:王荣荣(1989-),女,山东济宁人,博士研究生,研究方向为水利工程及灌区水土环境评估。E-mail:wrrong369@163.com
通信作者:徐存东(1972-),男,甘肃景泰人,教授,主要从事灌区水盐调控方面的研究。E-mail:xcudong@126.com

crops growth. However, the long-term comprehensive improvement of the saline-alkali land resulted in the alkalization tendency of cultivated land.

Keywords: saline-alkali land; different planting years; characteristics of salinity; Jingdian Irrigation District

土壤盐渍化是由自然或人类活动引起的一种主要的环境风险,已成为世界性的资源和生态问题,受到世界各国的广泛关注^[1-3]。据有关统计资料,全球约有 8.31 亿 hm^2 的土壤受到盐渍化的威胁,其中 58% 发生在灌溉农业区,尤其是干旱和半干旱地区的灌溉农业区^[4]。据有关数据统计,我国是受盐渍化影响严重的国家之一,盐渍土总面积约为 $3\,600 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中仅西北干旱和半干旱地区盐渍化土壤面积就占到了 69.03%^[5],盐碱荒地脱盐改造已成为实现干旱区高产稳产的主要途径之一。从区域可持续发展的角度,认识和掌握干旱荒漠区盐碱荒地长期综合治理条件下土壤盐分时空分异特征具有其紧迫性和必要性。

近年来,国内外大批学者针对盐碱地土壤盐分运移特征开展了大量研究。Eldeiry A A^[6]利用空间建模和遥感监测对苜蓿田的土壤盐分进行了研究。Cai S M^[7]运用支持向量机和纹理识别的方法对影响土壤的盐分信息进行了提取。余海英等^[8]运用野外调查和取样分析的方法,研究了设施栽培条件下土壤盐分的累积、迁移及离子组成的变化特点。张飞等^[9]运用遥感技术对渭干河-库车河三角洲绿洲内的土壤盐渍化程度进行了定量评价。陈碧华等^[10]通过采集不同种植年限大棚菜田土壤样品,研究了新乡市不同种植年限的大棚菜田土壤养分、盐分以及 pH 值的演变特征。孟超然^[11]运用统计学知识及地理信息系统技术,对不同滴灌年限下土壤耕作层盐分变异特征及土壤耕作层盐分与其他土壤指标的相关性进行研究。上述研究取得了大量有益的成果,为揭示土壤盐分的时空变化规律提供了坚实的理论基础。

景电灌区地处中国西北干旱荒漠区,低降雨高蒸发的特殊气候条件、低洼封闭的地势条件加上高强度的人类活动,导致了灌区大面积的水盐重组、运移和积聚,形成了大面积的次生盐碱地,严重制约了当地农业生产的可持续发展^[12],使得该区域成为研究干旱荒漠区区域尺度土壤盐渍化分异特征的典型试验区。有研究表明,合理耕作、灌溉、施肥等举措能够改善土壤化学性质,促进土壤脱盐,以提高土地生产力^[13-15]。随着灌区土壤盐渍化问题愈加突出,盐碱荒地的脱盐改造成为实现干旱区高产稳产的主要途径之一,然而目前针对西北干旱荒

漠区长期综合治理条件下盐碱荒地土壤盐分时空分异特征方面的研究较少。为此,本研究以景电一期灌区作为典型试验区,运用时空转化和相关性分析的方法对不同耕种年限盐碱耕地土壤盐分时空分异特征进行探究,以期合理开发和改良利用我国西北干旱区盐碱荒地提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

景电灌区是位于中国西北干旱荒漠区的大型梯级扬水灌区之一,地处甘肃省中部,地理区域处于东经 $103^\circ 20' \sim 104^\circ 04'$,北纬 $37^\circ 26' \sim 38^\circ 41'$ 之间,是连接甘、宁、蒙三省的交界地带,属于典型的温带大陆性气候。该地区干旱少雨,昼夜温差大,春季多风,夏季炎热;年日照时数长达 2 714 h,无霜期约 190 d,年平均气温约 8.77°C ,多年平均降雨量 185.6 mm,降水多集中在 6-9 月,多年平均蒸发量 2 433.8 mm。区域水位普遍较高,且矿化度高,多介于 $1.3 \sim 12.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。受到干旱气候条件、低洼封闭地势条件以及人为灌溉因素等的影响,灌区内土壤盐渍化特征十分明显。灌区现有盐碱耕地面积约 0.45 万 hm^2 ,约占耕地面积的 21.7%^[12],且有逐年增加的趋势。每年春季和冬季,在这些盐渍化土地的表面上都会出现一层白色物质。由于盐渍化现象的不断加剧,使得大量耕地被不断弃耕。实践证明,土壤盐渍化已成为制约灌区土地资源高效利用的主要障碍因子,严重制约了当地农业生产的可持续发展。图 1 为景电一期灌区地理位置图及典型的盐渍化现状图。

1.2 土壤特性

研究区土壤类型以荒漠盐化灰钙土为主,表层土壤有机质含量低且土壤结构松散,土壤中毛管孔隙多且连续程度好,对水、盐运移作用大,在干旱气候条件下,强烈的蒸发容易使下层盐分传导到土壤表层。土壤质地以砂壤和轻壤为主,物理性粘粒占 4.9%~26%,地表微有结皮,表层有机质含量 1.0% 左右。土壤腐殖质层薄,有机质含量低,碳酸盐剖面分化明显,碳氮比为 12~13。灌区土壤盐渍土盐离子主要以氯盐和硫酸盐为主^[16]。研究区 1971 年春季提水灌溉前不同深度土壤 TS 及盐分离子含量见表 1。

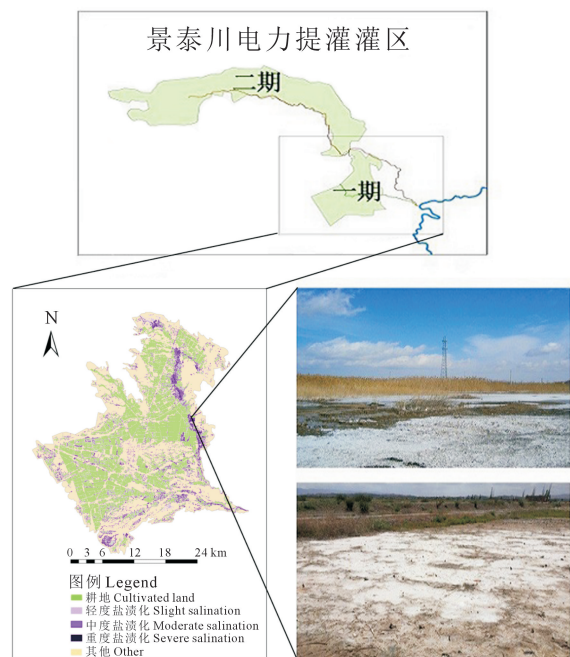


图 1 灌区地理位置及典型的土壤盐渍化现状图

Fig.1 The map of location of the district and the present soil salinization

表 1 荒漠灰钙土盐分离子组成情况表

Table 1 The salt ions of desert gray calcareous soil

采样深度/cm Sampling depth	盐分指标 Salt index/(g · kg ⁻¹)						
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	TS
0~30	0.60	1.90	1.57	1.23	0.35	0.56	6.10
30~60	0.51	1.60	2.29	0.89	0.43	0.47	6.50
60~90	0.48	1.65	2.53	1.55	0.46	0.64	7.30
90~120	0.56	1.78	2.67	1.87	0.52	0.56	6.82

1.3 土样采集与制备

采样点选在甘肃省景泰县景泰川电力提灌灌区一期灌区,该地区主要农作物为小麦,施用化肥主要以尿素为主。研究区地下水位为 1.3 m 左右。本研究分别在采用小麦-玉米-马铃薯轮作方式耕种 5、10、15 a 后的地块进行土样采集,采样时间在 2016 年 10 月 8-10 日,此时尚未进行冬灌洗盐,基本不受灌水以及冻融的影响,土壤盐分相对稳定,基本可以代表不同耕种年限盐碱耕地盐分的变化情况。同时在附近尚未开垦的盐碱荒地上采集土样作为对照。土样采集采取“S”形多点混合取样法,在不同耕种年限的耕地各选 5 个样点,同时在未耕种的空地上采集土样作为对照。每个样点周围 10 m 范围内分 0~5,5~10,10~20,20~40,40~60,60~80 cm 共 6 个土层进行采样,将相同土层的土样混合均匀后作为该样本点的土样。采集完的土壤样品带回实验室自然风干后,经过磨碎并过 2 mm

筛装入自封袋中备用。

1.4 测定项目及方法

土壤样品室内分析选取的指标为 TS、pH 值和盐分离子(水土比为 5 : 1),其中,pH 使用德国 Sartorius 公司 pH 电极(PB-10 标准型酸度计);CO₃²⁻和 HCO₃⁻用双指示剂盐酸中和滴定法测定;Cl⁻用 AgNO₃滴定法测定;Mg²⁺、Ca²⁺采用双指示剂络合滴定法测定;SO₄²⁻采用 EDTA 间接滴定法测定;Na⁺、K⁺采用火焰光度计法测定,具体分析方法参见参考文献[17],经测定,土壤样品中未检测到 CO₃²⁻,故 TS 采用所测得 7 种盐分离子加和法得出。由于在剖面垂直方向上取样间隔不同,在数据分析时,采用加权平均值进行分析。加权平均值 = Σ(样品含量×取样深度/分析深度)。文中平均值均指加权平均值。数据统计和相关性分析采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同耕种年限土壤 TS 及 pH 值变化

由图 2(a)可以看出,4 种不同处理的土壤盐分含量在剖面上随土层深度增加均呈现出先降低后升高的趋势,说明该地区土壤盐分存在明显的盐分表聚和底聚现象,且表聚现象更为明显。未耕种、耕种 5 a、耕种 10 a、耕种 15 a 的 0~80 cm 土壤盐分平均值依次为 4.081、0.865、0.533、0.411 g · kg⁻¹。表明随着耕种年限的增加,土壤盐分含量总体呈现出逐渐降低并逐渐趋于稳定的变化趋势,耕种 5、10、15 a 后土壤盐分含量相较未耕种土壤降幅分别为 78.8%、87.0%、89.0%;观察不同处理土壤盐分在剖面上的变化趋势及波动情况可知:未耕种土地土壤剖面盐分含量随土壤深度增加无明显规律性,且波动较大;耕种 5、10、15 a 后的土壤剖面含量变化趋势较一致,且波动较小。这是由于种植作物后,随着人为耕作因素干扰的不断加剧,加速了土壤脱盐的过程,使得土壤盐分不断被淋洗到下层从而产生累积,且随着轮作模式、灌溉制度的不断完善,土壤盐分含量变化趋势也随着耕种年限的增加逐渐趋于稳定。而灌区高蒸发、低降雨,加上全年多风的独特气候条件,诱发了土壤潜水蒸发,从而导致土壤中盐分不断运移到土壤表层,进而引发了土壤盐分表聚现象。

由图 2(b)可以看出,4 种不同处理下的土壤 pH 值随土壤深度的变化无明显规律性。随着耕种年限的增加,土壤 pH 值呈现出上升趋势,0~80 cm 全剖面平均值由未耕种时的 8.35 分别上升至耕种 5、10、

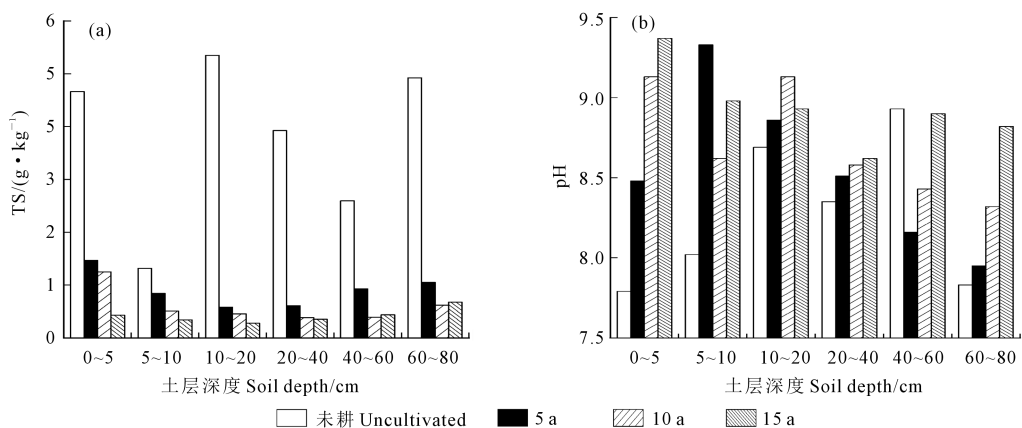


图 2 不同耕种年限盐碱耕地土壤 TS 及 pH 值变化

Fig.2 Changes of TS and pH in 0~80 cm soil profile in different planting years

15 a 后的 8.38、8.58、8.85,可见随着耕种年限的增加,土壤 pH 值呈现上升趋势,且增幅逐渐增大,耕种 5、10、15 a 后增幅分别为 0.3%、2.8%、5.9%。耕作层 0~20 cm 深度 pH 平均值由未耕种时的 8.30 分别上升至耕种 5、10、15 a 后的 8.88、9.00、9.05,增幅分别为 7.1%、8.5%、9.1%;而 20~80 cm 土层深度 pH 平均值由未耕种时的 8.37 分别上升至耕种 5、10、15 a 后的 8.21、8.44、8.78,增幅分别为 1.9%、0.8%、4.8%。可见随着耕种年限的增加,土壤全剖面均出现了碱化趋势,且耕作层碱化速度明显较快。

2.2 不同耕种年限土壤阳离子组成变化

2.2.1 阳离子剖面分布 图 3 是阳离子在 0~80 cm 土壤剖面分布图。由不同耕种年限 0~80 cm 土壤剖面 Na^+ 含量变化情况可以看出(图 3(a)),未耕种、耕种 5、10、15 a 的 Na^+ 含量平均值依次为 1.548、0.200、0.120、0.113 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,可以看出,与未耕种相比,耕种后土壤中 Na^+ 含量显著降低,且随着耕种年限的增加, Na^+ 含量平均值总体呈现逐渐降低趋势,其中耕种 5、10、15 a 后的 Na^+ 含量分别降低了 87.1%、92.3%、92.7%。可见耕种年限的增加对 Na^+ 含量的影响较大,使得土壤中 Na^+ 含量显著降低。从剖面分布态势可以看出,未耕种土壤 Na^+ 含量剖面变幅较大,在 0.079~2.100 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。耕种 5 a 后,各土层深度 Na^+ 含量均大幅下降,此后随耕种年限的增加,不同土壤深度 Na^+ 含量在剖面中的变化趋于稳定,受耕种年限的影响较小,且底聚现象较为明显,可见随着耕种年限的增加, Na^+ 并未在土壤表层积聚,而是随着灌水向下层淋溶,表明灌区部分耕地表层土壤发生碱化现象并非 Na^+ 水解导致的。

由不同耕种年限 0~80 cm 土壤剖面 Mg^{2+} 含量变化情况可以看出(图 3(b)),未耕种、耕种 5、10、

15 a 后 Mg^{2+} 含量平均值分别为 0.073、0.048、0.046、0.044 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,可见随着耕种年限的增加 Mg^{2+} 含量平均值总体呈现出逐渐降低并趋于稳定的趋势,其中耕种 5、10、15 a 后的 Mg^{2+} 含量分别降低了 34.0%、36.5%、40.2%。从剖面分布态势可以看出,未耕种土地中 Mg^{2+} 含量随着土壤深度的增加无明显变化规律。与未耕种相比,耕种后土壤中 Mg^{2+} 含量呈现出表层和底层积聚的现象,与剖面盐分总量的分布趋势相似,但与之不同的是 Mg^{2+} 底聚现象更为明显。

由不同耕种年限 0~80 cm 土壤剖面 Ca^{2+} 含量变化情况可以看出(图 3(c)),与未耕种相比,耕种 5、10、15 a 后 Ca^{2+} 含量平均值由 0.148 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别下降到 0.112、0.073、0.072 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,降幅分别为 24%、50.6%、51.5%。可见随着耕种年限的增加, Ca^{2+} 含量平均值总体同样呈现出逐渐降低并趋于稳定的趋势。从剖面分布态势可以看出,未耕种以及耕种 5、10 a 后土壤中 Ca^{2+} 含量均表现出盐分表聚和底聚现象,且表聚现象较为明显,耕种 15 a 后土壤中 Ca^{2+} 含量均呈现出盐分底聚现象,随着长期灌溉, Ca^{2+} 遭到淋溶,从而向下层积聚,而表层 Ca^{2+} 的流失在一定程度上会削弱作物的抗盐害能力,不利于作物的生长。

由不同耕种年限 0~80 cm 土壤剖面 K^+ 含量变化情况可以看出(图 3(d)),与未耕种相比,耕种 5、10、15 a 后 K^+ 含量平均值由 0.0374 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别下降到 0.019、0.018、0.016 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,降幅分别为 49.0%、51.7%、55.4%。可见, K^+ 含量平均值随着耕种年限的增加总体呈现出逐渐降低的趋势。从剖面分布态势可以看出,不同土壤深度 K^+ 含量随耕种年限的增加无明显规律,且在剖面中的变化不大,最大变幅仅为 0.03 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,受耕种年限的影响较小。

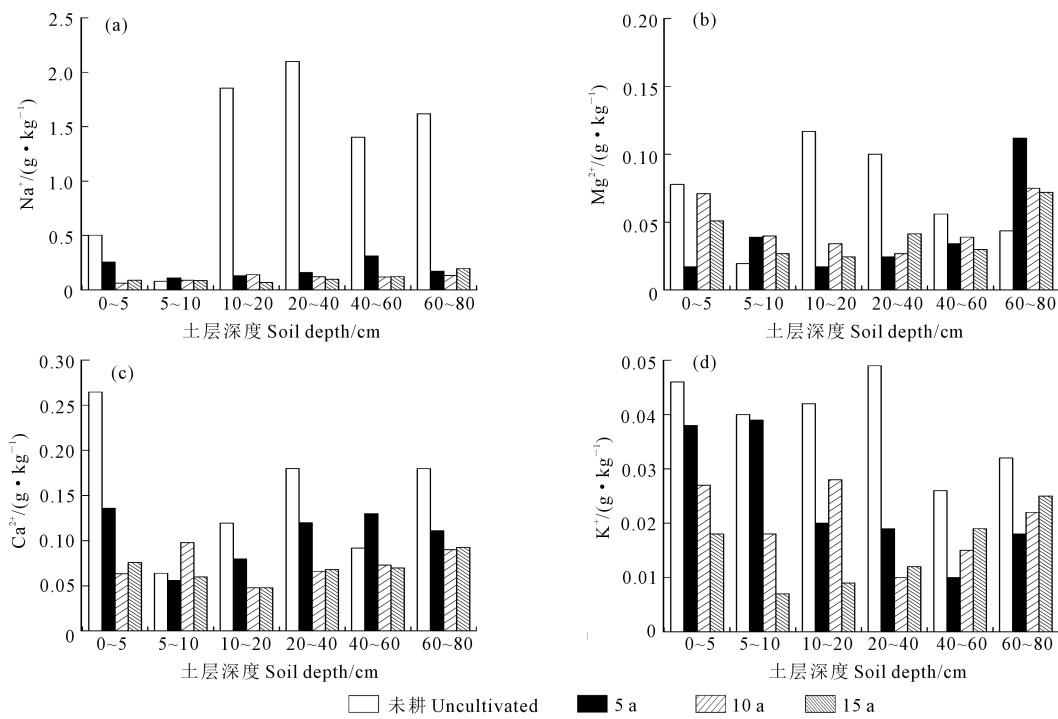


图 3 不同耕种年限阳离子在 0~80 cm 土壤剖面的分布

Fig.3 Changes of cations in 0~80 cm soil profile in different planting years

2.2.2 不同耕种年限 SAR 在剖面上的变化 SAR (sodium absorption ratio, SAR) 简称钠吸附比,是反映盐碱地碱化程度的重要指标,可作为盐碱地分类的重要依据,同时还可作为表征盐碱地改良利用过程中质量变化的重要指标^[18]。由表 2 可以看出,与未耕种土地相比较,耕种后 0~80 cm 土层中 SAR 的平均值显著减小,耕种 5a 后,平均值由未耕种时的 4.651 降至 0.712,降幅达到了 84.7%,说明在提水灌溉后,土壤中的 Na⁺以淋洗为主,随着耕种年限的增加,越来越多的 Na⁺被淋出土体。耕种 10、15 a 后 SAR 的平均值分别降至 0.502、0.445,降幅分别为 89.2%、90.4%,降幅趋于稳定。0~20 cm 土层 SAR 平均值同样随着耕种年限的增加不断减小,由未耕种时的 3.099 分别下降至耕种 5、10、15 a 后的 0.652、0.488、0.401,表明耕作层土壤中的可溶性 Na⁺的比例在不断下降。从不同耕种年限 SAR 在剖面中的变化趋势来看,未耕种土地中 SAR 值随土壤深度的增加无明显规律性,耕种 10、15 a 后 SAR 值随土壤深度的增加波动不大,相对稳定。这是由于经过长时期的灌溉、耕作使得土体结构逐渐均衡,土壤中各离子的含量达到了相对稳定的状态,从而使得 SAR 在全剖面的变化趋势趋于平缓。

2.3 不同耕种年限土壤阴离子组成变化

2.3.1 阴离子剖面分布 由图 4(a)不同耕种年限土壤中 Cl⁻含量的变化情况可以看出,与未耕种土壤

表 2 不同耕种年限钠吸附比在不同土层中的变化

Table 2 Changes of sodium absorption ratio (SAR) in 0~80 cm soil profile in different planting years

土层深度/cm Soil depth	未耕种 Uncultivated	耕种 5 a Cultivating for 5 years	耕种 10 a Cultivating for 10 years	耕种 15 a Cultivating for 15 years
0~5	1.216	0.922	0.235	0.478
5~10	0.387	0.505	0.335	0.423
10~20	5.397	0.591	0.691	0.353
20~40	5.612	0.600	0.557	0.386
40~60	5.159	1.086	0.499	0.503
60~80	4.735	0.512	0.463	0.490

相比,耕种 5 a 后土壤中的 Cl⁻含量显著下降,其平均值由 1.804 g·kg⁻¹降至 0.153 g·kg⁻¹,降幅高达 92%。这可能归因于 Cl⁻不易被土壤胶体所吸附,易于随水分运移的特点,所以在灌溉后有了很大的降幅。且随着耕种年限的增加,其含量逐年降低,耕种 10、15 a 所对应的平均值为 0.076、0.070 g·kg⁻¹,降幅分别为 95.8%、96.1%,可见随着耕种年限的增加,Cl⁻含量渐趋稳定。从 Cl⁻剖面分布态势可以看出,未耕种土壤中 Cl⁻含量变幅较大,无明显规律,中下层积聚现象较严重。随耕种年限的增加,不同土壤深度 Cl⁻含量在剖面中的变化不大,受耕种年限的影响较小。

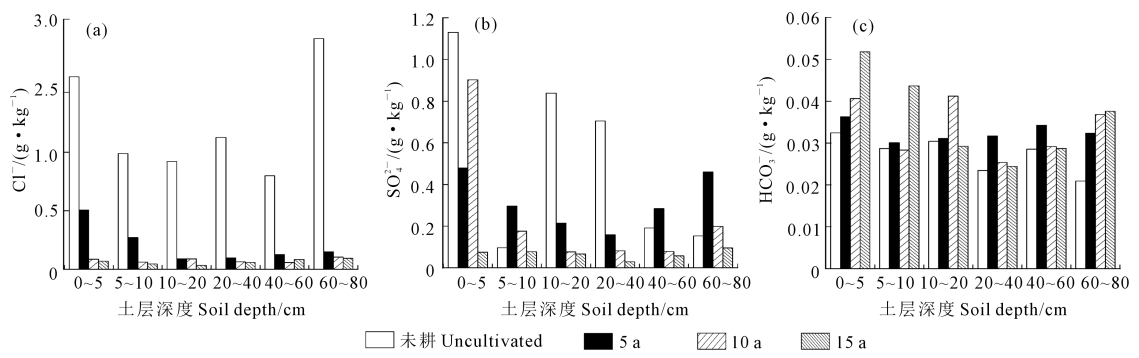


图 4 不同耕种年限阴离子在 0~80 cm 土壤剖面的分布
Fig.4 Changes of anions in 0~80 cm soil profile in different planting years

由图 4(b) 不同耕种年限土壤中 SO_4^{2-} 含量的变化情况可以看出,与未耕种土壤相比,耕种 5、10、15 a 后土壤中的 SO_4^{2-} 含量平均值由 $0.444\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分别降至 0.30 、 0.167 、 $0.063\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,降幅分别为 32.0%、62.4%、85.8%,可见不仅平均值逐年减小,且 SO_4^{2-} 含量的降幅逐年上升,随着耕种年限的不断增加,越来越多的 SO_4^{2-} 被淋洗出了 0~80 cm 土壤剖面。

由图 4(c) 不同耕种年限土壤中 HCO_3^- 含量的变化情况可以看出,随着耕种年限的增加,土壤中 HCO_3^- 含量变化不大,0~80 cm 剖面未耕种、耕种 5、10、15 a 所对应的平均值分别为 0.026 、 0.033 、 0.032 、 $0.032\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,可见全剖面 HCO_3^- 含量变化不大,无明显规律。0~20 cm 土层 HCO_3^- 含量平均值随着耕种年限的增加呈现出上升态势,由未耕种时的 0.031 分别增加至耕种 5、10、15 a 后的 0.032 、 0.038 、 $0.038\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与耕作层土壤 pH 值的变化趋势相一致,可见 HCO_3^- 含量可能是影响土壤发生碱化趋势的主要因素之一。

2.3.2 不同耕种年限 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 在剖面上的变化 试验区盐分离子中阴离子以 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主,因此 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值的变化反映了土壤中阴离子组成变化。其中 Cl^- 容易随水分移动,而 SO_4^{2-} 不易随水分移动,二者的比值可以作为盐分的淋洗状况的指标。由表 3 可知,未耕种土地土壤剖面的比值无明显规律,且变幅较大,各土层 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的比值均超过 1。耕种后全剖面 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值显著减小,并呈现出一定的规律性。0~20 cm 土层 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的平均值随着耕种年限的增加逐渐降低,耕种 5、10、15 a 后平均值分别为 0.70 、 0.69 、 0.62 。而 20~80 cm 土层 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的比值随着耕种年限的增加而逐渐上升,耕种 5、10、15 a 后平均值分别为 0.46 、 0.67 、 1.49 。从 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的比值的角度看,耕种后由于大水漫灌使得土壤中大部分 Cl^- 被淋出了 0~80 cm 土体。且随着耕种年限

表 3 不同耕种年限 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 在不同土层中的变化
Table 3 Changes of $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ in 0~80 cm soil profile in different planting years

土层深度 Soil depth /cm	未耕种 Uncultivated	耕种 5 a Cultivating for 5 years	耕种 10 a Cultivating for 10 years	耕种 15 a Cultivating for 15 years
0~5	2.306	1.056	0.094	0.913
5~10	10.321	0.912	0.352	0.573
10~20	1.098	0.420	1.158	0.499
20~40	3.108	0.612	0.771	2.044
40~60	4.168	0.445	0.725	1.448
60~80	18.700	0.326	0.517	0.978

的增加,0~20 cm 土层表现为持续脱盐趋势,20~80 cm 土层表现为持续积盐趋势。

3 结 论

1) 与未耕种盐碱荒地相比较,耕种 5、10、15 a 后 0~80 cm 各土层盐分总量在剖面上随着土壤深度的增加呈现先下降后上升的趋势,表现出盐分表聚和底聚现象,且表聚现象更为明显。同时随着耕种年限的增加,整个土壤剖面的盐分含量呈现出逐年降低趋势。可见随着长期合理灌溉、耕作等人类活动因素的影响,使得土壤盐分得到了很好的淋溶,在一定程度上改善了作物的生长环境。

2) 土壤 pH 值在剖面上随土壤深度的增加无明显变化规律,随着耕种年限的增加,整个土壤剖面土壤 pH 值呈现出逐渐上升趋势,由未耕种时的 8.35 上升至耕种 15 a 后 8.85,表明灌区土壤在脱盐过程中出现了碱化趋势。

3) 与未耕种盐碱荒地相比较,土壤中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、SAR、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 均随着耕种年限的增加呈现出逐渐下降并趋于稳定的趋势; HCO_3^- 含量随着耕种年限的增加变化不大,且无明显规律性,受耕种年限的影响较小。