

# 西北地区种植甘草对土壤次生盐渍化的影响

李昂<sup>1</sup>, 吴应珍<sup>2</sup>, 马明广<sup>1</sup>, 张鸣<sup>1</sup>, 孙海丽<sup>1</sup>, 闫立本<sup>3</sup>

(1. 兰州城市学院 化学与环境工程学院, 甘肃 兰州 730070;  
2. 甘肃农业大学 人文学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃酒泉科技示范农场, 甘肃 酒泉 735000)

**摘要:** [目的] 研究西北地区植被特征指标与土壤表层盐含量、碱性间的相互关系, 为该区土壤次生盐渍化防治工作提供科学依据。[方法] 以甘草(*Glycyrrhiza uralensis*) 植被和其下部土壤为研究对象, 通过测定甘草植被的盖度、高度、地上生物量和其下部土壤表层(0—5 cm) 的含水率、pH 值、电导率、盐含量等指标, 并利用 SPSS 统计软件进行分析。[结果] 甘草植被的盖度、高度、地上生物量和其下部土壤的含水率均随甘草生长年限的增加呈显著升高的趋势( $p < 0.05$ ), 而土壤的 pH 值、电导率、盐含量正好相反, 均表现出显著降低的趋势( $p < 0.05$ ); 相关分析结果显示, 耕地表层土壤的 pH 值、盐含量与甘草植被特征指标间呈显著的负相关关系, 相关系数的大小顺序均为: 植被盖度 > 植株高度 > 地上生物量; 回归分析显示, 土壤 pH 值和盐含量与甘草植被的这 3 个性状指标间均表现为负线性函数关系, 甘草植被的盖度、高度、地上生物量每提高 1 个单位, 可使土壤表层的 pH 值分别下降 0.012, 0.011 和 0.002, 盐含量分别降低 0.108, 0.107, 0.015 g/kg。[结论] 西北干旱地区耕地中种植甘草对其下部土壤表层的盐含量和碱性(pH 值) 影响显著, 其中植被的盖度对表层土壤的盐碱影响最大; 从耕地表层抑盐角度考虑, 应优先选择种植枝叶稠密、植株高大的作物。

**关键词:** 植被覆盖; 土壤的次生盐渍化; 土壤盐含量; 甘草

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)06-0047-06

**中图分类号:** S157

**文献参数:** 李昂, 吴应珍, 马明广, 等. 西北地区种植甘草对土壤次生盐渍化的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 047-052. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.008

## Effects of *Glycyrrhiza Uralensis* Plantation on Soil Secondary Salinification in Northwest China

LI Ang<sup>1</sup>, WU Yingzhen<sup>2</sup>, MA Mingguang<sup>1</sup>, ZHANG Ming<sup>1</sup>, SUN Haili<sup>1</sup>, YAN Liben<sup>3</sup>

(1. School of Chemistry and Environmental Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. College of Humanities, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. Jiuquan Science Demonstration Farm in Gansu Province, Jiuquan, Gansu 735000, China)

**Abstract:** [Objective] The relationship between salinification and alkaline of topsoil and vegetation cover was analyzed to provide scientific basis for the prevention and control of soil secondary salinization in this area. [Methods] Plant height, aboveground biomass of *glycyrrhiza* community and soil moisture, pH value, salt content in soil surface(0—5 cm) were measured. The relationships between indexes of vegetation characteristics and physical and chemical indexes of topsoil through measuring vegetation coverage were analyzed. [Results] With the extension of growing years, the vegetation coverage, plant height and aboveground biomass of *Glycyrrhiza uralensis* appeared an increasing trend. On the contrary, salt content and pH value of topsoil indicated a decreasing trend. Correlation analysis displayed, there was a negative relation between soil salt content and pH value of topsoil and all indexes of vegetation characteristics. Correlation coefficients ranked as vegetation coverage > plant height > aboveground biomass. Regression analysis indicated, salt content and pH value of topsoil and indexes of vegetation characteristics all showed a negative linear relation. When coverage, height and aboveground biomass of *Glycyrrhiza uralensis* vegetation each increased one

收稿日期: 2015-07-16

修回日期: 2016-02-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“豆禾牧草混播防治兰州新区周边耕地土壤退化机理研究”(31560185); 兰州城市学院博士科研启动基金项目(2011-09); 兰州城市学院校长科研创新基金项目(LZCU-XZ2014-02)

第一作者: 李昂(1969—), 男(汉族), 甘肃省兰州市人, 博士, 副教授, 主要从事退化环境恢复和治理研究。E-mail: liang@lzcu.edu.cn.

unit, pH values of topsoil decreased 0.012, 0.011 and 0.002, salt content of topsoil decreased 0.108, 0.107 and 0.015 g/kg. [Conclusion] Vegetation significantly influenced salt content and pH value of topsoil. The most influence index is vegetation. When only considering the restraining of soil salt, those crops with more branches and leaves, and with high stalks should be selected.

**Keywords:** vegetation coverage; soil secondary salinification; soil salt content; *Glycyrrhiza uralensis*

西北地区自然环境恶劣,这里气候干旱、降雨稀少、太阳辐射强烈、土壤盐含量相对较高,对农作物的定期灌溉就成了保证农业持续发展的一项重要举措。在灌溉过程中,因灌溉不当(如大水漫灌)而引发的土壤次生盐渍化问题为该区农业可持续发展所面临的主要障碍之一<sup>[1-2]</sup>。许多研究<sup>[3-4]</sup>发现,干旱、半干旱灌区耕地中的水盐运动表现出季节性的积盐和脱盐过程的交互更替,即春季蒸发积盐,夏季淋溶脱盐,秋季蒸发积盐,冬季冻结稳定。以往治理土壤盐碱大多采用水利工程措施,这不仅工程规模大、费用高,而且,改良过程中除把盐离子淋溶外,同时也排走植物必需的一些矿质元素(如 Fe, N, P 等)<sup>[5]</sup>。在西北地区采取引水洗盐来治理土壤盐碱,不仅浪费宝贵的水资源和流失土壤肥力,而且还有可能使下游耕地的地下水位升高,加重其盐碱危害<sup>[6]</sup>。盐碱地的改良不仅要降低土壤盐含量,还要提高土壤肥力<sup>[3]</sup>。鉴于以上认识,近年来,盐碱地的生物治理受到广大科技工作者的关注<sup>[7-8]</sup>。如蔺海明等<sup>[7]</sup>研究发现,与裸地相比,种植毛苕子可使耕地 0—20 cm 土层盐含量降低 77.7%~88.3%;彭红春等<sup>[9]</sup>在治理柴达木盆地弃耕盐碱地时发现,建植人工混播草地不仅能提高植被的盖度和地上生物量,而且还能显著降低 0—30 cm 土层的盐含量;李昂等<sup>[10]</sup>研究也发现,当耕地种植小麦、小麦/毛苕子、红豆草后,在其生长期土壤表层

(0—20 cm)的盐含量均比裸地低;当单作小麦处理中的春小麦收获后,其表层土壤盐含量快速升高,秋末时表层含盐量甚至比裸地的还高。从以上研究可以看出,前人在生物措施治理土壤盐碱方面已做了大量研究,但有关植被性状特征与土壤表层盐含量间到底有怎样的定量关系,以及植被的哪些性状指标对土壤盐碱影响最为明显等有关问题却鲜有文献报道。甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)为豆科多年生草本或亚灌木,主要分布于光照充足、昼夜温差较大、雨量较少的荒漠与半荒漠地区,具有抗寒、抗旱和耐热、耐盐碱等特点。甘草广泛用于医药、食品、日用化工、畜牧养殖等产业,是社会需求最大的中药材。随着甘草野生资源的急剧减少和各地禁止乱挖滥采,人工栽培甘草面积不断扩大。为了提高农民收入、保护生态环境,甘肃酒泉地区政府根据市场需求和当地环境条件,积极引导农民调整农业种植结构,大力推广甘草种植。鉴于甘草植被在生态建设中具有固沙、固土、改善土壤肥力等作用,针对西北地区耕地春、秋季积盐的特点,试验以甘草植被和其下部土壤为研究对象(图 1),通过测定不同生长年限甘草植被的盖度、高度、地上生物量及其下部土壤表层(0—5 cm)的含水率、电导率、盐含量,来揭示种植甘草对土壤盐碱的影响,以及土壤表层盐含量与甘草植被间的相互关系,旨在为西北地区采取生物措施预防土壤次生盐渍化提供科学依据。



图 1 春季同一地块中裸地及甘草地的盐碱状况

## 1 试验区概况

试验地点位于甘肃酒泉科技示范农场(39°33'12"N,

99°03'06"E),该区气候属中温带沙漠干旱性气候类型,年日照时数 3 288 h,年有效积温 1 800~3 600 °C,降水量年均 83 mm(主要集中于 6,7,8 月

这3个月),蒸发量年均2 511 mm,干燥指数 $>4$ ,土壤类型为棕漠土和风沙土<sup>[11]</sup>。

## 2 试验设计及测定

每年4月中旬农场利用播种机、并采用条播方式播种甘草(施肥和播种同步进行),播种行距40 cm、株距10 cm,密度25万株/hm<sup>2</sup>。为了维持甘草正常生长,每年4月初按每1 hm<sup>2</sup>过磷酸钙750 kg、尿素300 kg、钾肥150 kg量撒播施肥,同时引祁连山融化雪水漫灌甘草地,此后5—8月的每月月初利用地下水浇灌耕地(漫灌水深10 cm左右),地下水盐含量在1~2 g/L范围变化<sup>[12]</sup>。甘草地及未耕地根据杂草生长状况定期除草,甘草地的其他田间管理依据甘草栽培常规管理措施进行。根据农场甘草生长3~4 a后采收的实际情况,试验采取空间序列替换时间序列的研究方法<sup>[13]</sup>,即首先在该农场的同一地块中选取未耕种(CK)和甘草已生长1~4 a的地块共5块样地(每块样地的面积约2 000 m<sup>2</sup>)。然后分别于2012年9月30日和2013年4月30日在每个样地中随机设置4个大小1 m×1 m的样方,并采用常规方法测定样方内甘草植被的盖度、高度和地上生物量<sup>[14-15]</sup>。地上部分测试完后再用土钻钻取0—5 cm土层的土样,并利用所取土样测定土壤的含水率、pH值、电导率和盐含量(取土样前1月均未灌水)。土壤含水率采用烘干法,土壤的pH值和电导率采用水土比5:1的悬液和浸提液分别用酸度计和电导率仪直接测定,土壤盐含量采用残渣烘干法测定<sup>[16]</sup>。

试验所得数据采用SPSS 13.0统计软件进行统计分析,即各指标分别进行单因素方差分析,若差异

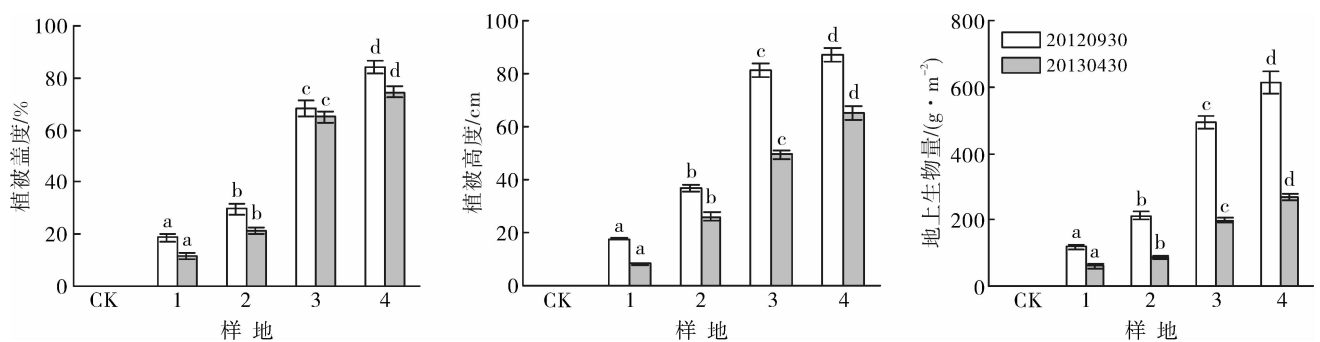
显著再用S-N-K方法进行不同水平间的多重比较;多个因素间的相关分析采用Pearson法,并用双尾检测的方法检验其显著性;图表采用Excel 2003软件进行制作<sup>[11,13]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同生长年限甘草植被的特征

就甘草植被的盖度而言(图2),2012年9月测定结果显示,甘草生长1 a样地中的植被盖度最低、仅为18.8%,而甘草生长2,3,4 a样地中的盖度分别提高到29.8%,68.3%,84%;4月末测定结果同样显示,2~4 a样地中的甘草植被盖度仍比1 a样地中盖度提高近0.9,4.8,5.6倍。对于植被高度而言(图2),在秋末和翌年春季2次测定的时间点,4 a样地中的甘草植被高度均最高,3,2,1 a样地中的植被高度分别比4 a样地的降低近6.7%,57.9%,79.7%和23.8%,60.2%,87.6%。对于甘草植被的地上生物量而言(图2),首次测定结果显示,甘草生长1 a样地中的地上生物量仅为118.4 g/m<sup>2</sup>,而2~4 a样地中分别为212.8,493.6,614.3 g/m<sup>2</sup>,分别比1 a样地中的量提高近0.8,3.2,4.2倍;翌年4月测定结果同样显示相似趋势。

从以上测定结果还可看出(图2),尽管经秋末至翌年春季的风力作用,甘草地中的部分枯枝落叶被风吹蚀,甘草植被的盖度、高度、地上生物量均有不同程度的下降,但2次的结果均显示,随着甘草生长年限的增加,甘草植被的盖度、高度、地上生物量均呈升高趋势,且不同年际间表现出显著差异( $p<0.05$ )。



注:样地CK为裸地;1—4为甘草生长1~4 a样地;同一测定时间不同处理上的不同字母表示差异达到显著( $p<0.05$ )。下同。

图2 不同样地中甘草植被的群落特征

### 3.2 甘草植被下方土壤的含水率及盐碱含量

就土壤的含水率而言(图3),首次测定(2012年9月)结果显示,裸地(CK)表层土壤(0—5 cm)的含水率仅为2.73%,而甘草生长样地中的土壤含水率

均比裸地高,甘草生长1~4 a样地中的含水率分别比裸地提高近0.3,0.7,1.1,1.5倍,即随着甘草生长年限的增加,耕地地表的含水率表现出显著升高的趋势( $p<0.05$ );第2次测定(2013年4月)同样也表现

出相同的趋势。其原因可能是:秋末和初春季节,该地阳光充足,由于耕地表层覆盖有甘草枝叶(或枯枝落叶),减弱了太阳光对地表的直接照射和土壤水分的自然蒸发,从而使甘草地地表的土壤含水率较裸地高;就甘草地而言,随着甘草生长年限的增加,地表的枯枝落叶覆盖量显著增加,地表水分蒸发明显减少,从而甘草地地表的含水率表现出显著升高的趋势。类似研究如王学芳等<sup>[17]</sup>也发现,4月初春播地(裸地)的表层土壤(0—5 cm)含水率仅为 4.2%,而地表覆盖有冬小麦和冬油菜枯叶的表层土壤含水率达 8.5%和 11.8%。对于土壤的 pH 值而言(图 3),其变化趋势正好相反,2012 年 9 月末测定结果显示,裸地的 pH 值最高、达 8.83,而种植甘草样地中的 pH 值均比裸地低,甘草生长 1,2,3,4 a 样地中的 pH 值分别比裸地降低近 2.3%,2.9%,7.6%和 11.5%,即随着甘草生长年限的增加,甘草样地中的 pH 值表现出降低趋势;翌年 4 月测定结果的变化趋势也与 9 月类似。就土壤的电导率而言(图 3),其变化趋势与 pH 值类似,裸地的均值仍最高,而甘草生长 1,2,3,

4 a 样地中的电导率均值分别比裸地均值降低了 33.2%,70.2%,81.5%,93.8%,即表层土壤的电导率随着甘草生长年限的延长呈显著降低趋势( $p < 0.05$ )。对于土壤表层的盐含量而言(图 3),甘草地表层的可溶性盐含量均比裸地低,甘草生长 1~4 a 样地中的盐含量均值分别为 7.21,3.45,1.83,1.63 g/kg,分别比裸地均值降低了 37.3%,70%,84.1%,85.9%,即随着甘草生长年限的增加,耕地表层土壤的盐含量表现出明显降低的趋势( $p < 0.05$ )。产生这种变化趋势的原因可能是由于甘草地地表覆盖有枯枝落叶,减少了土壤水分的自然蒸发(即提高了表层土壤的含水率)和随水上移到土壤表层的盐分积累,从而使甘草地表层的盐含量明显低于裸地;就甘草地而言,随着甘草生长年限的增加,样地地表的枯枝落叶覆盖量显著增加,地表水分蒸发明显减少(即地表水分含量明显提高),从而使得样地表层土壤含盐量显著降低。这一变化趋势从图 1 中裸地、甘草生长 1 a 和 3 a 样地的表层盐碱分布情况中可以得到直观验证。

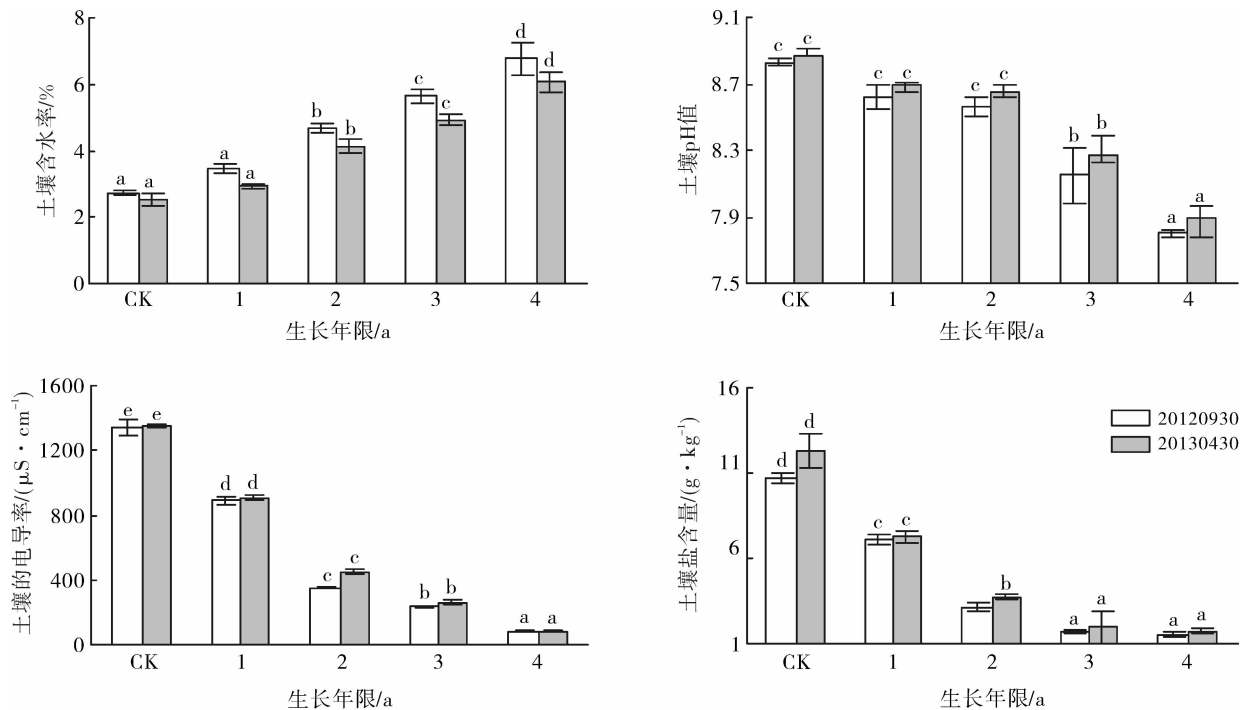


图 3 不同样地土壤表层(0—5 cm)的含水率及盐碱含量

### 3.3 土壤盐碱与植被特征指标间的相互关系

相关分析显示(表 1),甘草植被的盖度、高度和地上生物量任意二者间均表现为显著正相关关系( $p < 0.05$ ),其中盖度与高度间相关系数最大( $r = 0.958$ ),其次依次为高度与地上生物量、盖度与地上生物量;表层土壤含水率与甘草植被的特征指标

间均表现出正相关关系,其中土壤含水率与甘草植被盖度间相关系数最高( $r = 0.912$ ),而土壤含水率与土壤的 pH 值、电导率、盐含量间均表现出负相关关系;对于 pH 值而言,其与甘草植被特征指标间均表现出负相关关系,其中甘草植被盖度与 pH 值间相关性最强( $r = -0.910$ );对于电导率和含盐量而言,二者间

表现出显著的正相关关系( $r=0.975$ ),而它们与甘草植被的特征指标间均表现出显著的负相关关系,其中盖度与二者间的相关性最强( $r=-0.896$ ,  $r=-0.862$ )。回归分析结果显示,土壤含水率与甘草植被的盖度( $r=0.912$ )、高度( $r=0.870$ )、生物量( $r=0.784$ )间分别存在显著的正线性回归关系,其中土壤含水率与植被盖度间的相关系数最大;甘草植被盖度每提高1%,可使表层土壤含水率提高0.043%。对于土壤的pH值而言(图3),其与甘草植被的盖度

( $r=-0.910$ )、高度( $r=-0.873$ )、生物量( $r=-0.865$ )间表现出负线性回归关系,其与植被盖度间的相关系数仍为最大;盖度每提高1%,可使耕地表层土壤的pH值降低0.012。对于耕地表层的含盐量而言,它与甘草植被的盖度( $r=-0.862$ )、高度( $r=-0.862$ )、生物量( $r=-0.742$ )间也表现为负线性回归关系,其中盖度与含盐量间的相关系数依然最大;盖度每降低1%,可使表层土壤盐含量提高0.108 g/kg。

表1 甘草植被特征指标与土壤盐碱含量间的相关分析

指标	盖度	高度	地上生物量	土壤含水率	pH值	电导率	盐含量
盖度	1	0.958**	0.872**	0.912**	-0.910**	-0.896**	-0.862**
高度		1	0.943**	0.870**	-0.873**	-0.894**	-0.862**
地上生物量			1	0.784**	-0.818**	-0.771**	-0.742**
土壤含水率				1	-0.865**	-0.894**	-0.864**
pH值					1	-0.807**	-0.759**
电导率						1	0.975**
盐含量							1

注:样本数  $n=40$ ; \*\*表示在0.01水平上显著相关(双尾检测)。

## 4 讨论与结论

干旱、半干旱地区由于大水漫灌、过量灌溉等不合理的灌溉措施,以及排水设施的不完善等原因,导致地下水位抬高并超过临界水位;再加上地表水分蒸发剧烈,使得地下水和溶解的盐离子通过土壤孔隙移动至地表,水分蒸发而盐分留存积累;当积累到一定程度时,土壤中的盐分就会对农作物产生盐碱危害<sup>[1,18]</sup>。当耕地种植农作物后,通过农作物地上部分的遮蔽,降低和减缓了地表的温度和空气流速,同时地表的空气湿度也相应地得到提高,从而减弱了土壤水分的自然蒸发和移动到土壤表层的可溶性盐分(图1)<sup>[3]</sup>。如李发明等<sup>[19]</sup>研究发现,耕地0—10 cm土层的电导率、盐含量随紫花苜蓿种植年限的增加呈下降趋势。本研究结果也显示,甘草植被的盖度、高度、地上生物量和地表土壤的含水量随着甘草生长年限的增加,均表现出显著升高的趋势;而土壤表层的pH值、电导率、盐含量变化正好相反,均表现出显著降低的趋势。其原因可能是当甘草生长年限增加时,耕地地表被甘草植被覆盖的越来越厚实,从而使得土壤表层水分的自然蒸发量变得愈来愈少,相应地也使上移到土壤表层的盐分和土壤碱性(pH值)呈减小趋势。这一结果也与蔺海明等<sup>[7]</sup>研究毛苕子抑制土壤积盐所得的研究结果相一致。

地上植物(或枯枝落叶)是植被生态功能发挥的前提和基础。尽管前人已对生物措施防治土壤盐碱做了大量研究,但却很少探讨植被特征指标与土壤盐碱间的定量相互关系。如蔺海明等<sup>[7]</sup>尽管研究了不同播种密度毛苕子对土壤盐碱的影响,但却没有阐明土壤盐碱与植被特征指标间的相互关系;彭红春等<sup>[9]</sup>尽管对比了人工草地与自然植被的地上生物量和地表盐含量的动态变化,遗憾地是也没有定量分析植被地上生物量与土壤盐分间的相互关系。本研究相关分析显示,耕地表层的含水率与地表植被的盖度、高度、地上生物量间呈显著的正线性关系,即当植被地上部分增大时,其下部土壤表层的含水率也相应地线性增加。而对于土壤的pH值而言,其与地表植被特征量间呈显著的负线性关系,即当甘草植被的盖度、高度、地上生物量每降低1个单位,可使耕地表层土壤的pH值分别上升0.012,0.011,0.002。对于耕地表层的盐含量而言,其与植被特征指标间也呈显著的负线性函数关系,即当地表植被增加时,其下部土壤表层的盐含量呈明显下降趋势,其中植被盖度对耕地表层盐含量的影响最大;当植被盖度每增加1%时,可使土壤表层盐含量降低0.108 g/kg。

综合以上,西北干旱地区灌溉耕地中的地表植被对其下部土壤表层的盐含量和碱性(pH值)影响显著;就地上植被而言,对土壤表层盐碱影响最大的是

其盖度;从耕地表层抑盐的角度考虑,西北灌区应优先选择种植枝叶稠密、植株高大的作物。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王葆芳,杨晓晖,江泽平.引黄灌区水资源利用与土壤盐渍化防治[J].干旱区研究,2004,21(2):139-143.
- [2] 缙倩倩,韩致文,王国华.中国西北干旱区灌区土壤盐渍化问题研究进展[J].中国农学通报,2011,27(29):246-250.
- [3] 李昂.生物措施防治土壤盐渍化的机理及研究进展[J].甘肃高师学报,2013,18(2):56-59.
- [4] 任继周,朱兴运.河西走廊盐渍地的生物改良与优化生产模式[M].北京:科学出版社,1998.
- [5] 赵可夫,范海,江行玉,等.盐生植物在盐渍土壤改良中的作用[J].应用与环境生物学报,2002,8(1):31-35.
- [6] 王少丽,高占义,郭庭天.灌区土壤盐渍化发展模拟预测与对策研究[J].灌溉排水学报,2006,25(1):71-76.
- [7] 蔺海明,贾恢先,张有福,等.毛苕子对次生盐碱地抑盐效应的研究[J].草业学报,2003,12(4):58-62.
- [8] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845.
- [9] 彭红春,李海英,沈振西,等.利用人工种草改良柴达木盆地弃耕盐碱地[J].草业学报,2003,12(5):26-30.
- [10] 李昂,吕正文,蔺海明,等.秦王川灌区不同绿色覆盖方式预防土壤次生盐渍化效应研究[J].草业科学,2008,25(10):20-24.
- [11] 李昂,高天鹏,张鸣,等.西北风蚀区植被覆盖对土壤风蚀动态的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):210-213.
- [12] 李昂,张鸣,蔺海明,等.西北风蚀区种植甘草对地表微环境和土壤物理性状的影响[J].干旱区资源与环境,2014,28(10):128-132.
- [13] 李昂,张鸣,蔺海明,等.种植甘草预防土壤风蚀效应[J].草业科学,2014,31(5):839-843.
- [14] 李昂,张鸣,杜国祯.物种组成、丰富度、密度和土壤养分对群落补偿效应的影响[J].生态学杂志,2012,31(10):2443-2448.
- [15] Li Ang, Niu Kechang, Du Guozhen. Resource availability, species composition and sown density effects on productivity of experimental plant communities [J]. Plant Soil, 2011,344(1):177-186.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2007:178-188.
- [17] 王学芳,孙万仓,李芳,等.中国西部冬油菜种植的生态效应评价[J].应用生态学报,2009,20(3):647-652.
- [18] 张浩,李志华,何蛟涛,等.干旱区盐渍土形成和水盐运移机理[J].生物学通报,2011,46(4):10-12.
- [19] 李发明,朱淑娟,王耀林,等.引黄灌区种植苜蓿对盐渍化土地理化性状的影响[J].水土保持研究,2009,16(4):104-108.

(上接第 46 页)

- [28] 吴雅琼,刘国华,傅伯杰,等.中国森林生态系统土壤 CO<sub>2</sub> 释放分布规律及其影响因素[J].生态学报,2007,27(5):2126-2135.
- [29] 刘斌,鲁绍伟,高东,等.物理性环境因素对淮北地区杨树人工林土壤呼吸的影响[J].西部林业科学,2014,43(6):148-153.
- [30] 吴蒙,马姜明,梁士楚,等.桂林市尧山桉树及马尾松林春、夏两季土壤碳通量特征[J].水土保持通报,2015,35(1):303-310.
- [31] 杨金艳,王传宽.土壤水热条件对东北森林土壤表面 CO<sub>2</sub> 通量的影响[J].植物生态学报,2006,30(2):286-294.
- [32] 李小宇,李勇,于寒青,等.退耕还林坡地土壤 CO<sub>2</sub> 排放的空间变化:地形的控制作用[J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1217-1224.
- [33] 刘硕,李玉娥,孙晓涵,等.温度和土壤含水量对温带森林土壤温室气体排放的影响[J].生态环境学报,2013,22(7):1093-1098.