

干旱绿洲农田盐渍化对土壤理化特性和农艺特征的影响

王 燕^{1,2}, 赵学勇¹, 赵哈林¹, 潘成臣^{1,2}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 在河西走廊西部大田试验条件下, 通过一个生长季的观测, 分析研究农田盐渍化对土壤理化特性和典型牧草(紫花苜蓿)和农作物(大麦)农艺性状、干物质积累和产量的影响。结果表明:(1) 在0~20 cm土层, 牧草土壤容重沿盐渍化梯度增加了3%, 4.54%, 8.62%, 9.96%, 农作物土壤容重没有明显变化规律; 土壤有机质显著降低, 且0~10 cm土层的降低速率快于10~20 cm土层;(2) 盐渍化程度等于或高于中度盐渍化水平时, 大麦植株的穗长、穗粒数和秸秆重受到显著影响; 在开花、孕穗和灌浆期的盐度既会降低籽粒产量也降低秸秆产量。与农作物相比, 盐渍化程度等于或高于轻度盐渍化水平时, 牧草植株的株高、主侧枝长和主根直径会受到影响, 进而导致牧草产量的降低。因此, 在农业生产中, 可根据两种作物在不同盐渍化梯度各生育期的受害状况进行相应的水盐调控和耕作管理, 以实现盐渍化农田作物产量的维持和增加。

关键词: 盐渍化梯度; 土壤理化特性; 苜蓿; 大麦; 农艺性状; 产量

中图分类号: S153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)03-0184-10

Effects of salinization on soil physicochemical characteristics and agronomic traits in arid oasis

WANG Yan^{1,2}, ZHAO Xue-yong¹, ZHAO Ha-lin¹, PAN Cheng-chen^{1,2}

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In attempt to study effects of farmland salinization on soil physicochemical properties and agronomic traits, dry matter accumulations and yields of one-growing-season of representative forage (*Medicago sativa* L.) and cereal (*Hordeum vulgare* L.) were studied in field conditions in Hexi Corridor of West China. The results showed that: (1) In the depth of 0~20 cm, along with the salinization gradients, soil bulk density in forage was increased by 3%, 4.54%, 8.62%, 9.96%, No soil bulk density change was observed in cereal, but its soil organic matter was significantly decreased, and the decrease rate in the depth of 0~10 cm was faster than that in the depth of 10~20 cm; (2) When soil salinity level equal to or higher than moderate salinization level, ear length, grain number and straw weight of barley plant were significantly affected. Salinity at flowering, early ear formation and grain-filling stages reduced both grain and straw yields. When soil salinity level equal to or higher than slightly salinization gradient, plant height, length of main and secondary branch, and tap root diameter of alfalfa plant were decreased. In conclusion, based on the agronomic traits and the different impact of salinization on these two crops at different growth stages, water and salt need to be regulated and controlled and proper cultural practices need to be employed to maintain, stabilize, and increase crop yield in saline environment.

Keywords: salinization gradients; soil physicochemical characteristics; alfalfa; barley; agronomic traits; yield

土地盐渍化是指土壤中可溶性盐类随水向土壤表层移动并累积,使可溶性盐含量超过一定界限而对植物的生长发育和生产活动产生不良影响的过程。而土壤次生盐渍化是指在干旱、半干旱地区由

收稿日期:2013-01-15

基金项目:国家 973 课题(2009CB421303);国家自然科学基金课题(30972422);国家科技支撑课题(2011BAC07B02-06)

作者简介:王 燕(1983—),女,甘肃庆阳人,博士生,主要从事生态恢复和土壤盐渍化等方面的研究。E-mail: wang1983yan0210@163.com。

于气候、地貌类型及水文地质条件的不同而存在的非盐渍化土壤,因人类的不合理灌溉,促使地下水中的盐分沿土壤毛管孔隙上升并在地表积累,由此引起的土壤盐渍化。土壤盐渍化后,土壤溶液的渗透压增大,土体通气性、透水性变差,养分有效性降低,进而导致作物减产。盐渍化土壤是一种低产土壤,甚至是不毛之地,但在很多情况下又兼具地势平坦和灌溉之便,因而又是农业生产中可改良的后备土地。特别是在当前,随着工农业生产的飞速发展,人口的不断增加,粮食需求的日益高涨,以及耕地资源的愈趋贫乏,改良和利用大面积的盐渍土地资源则成为众多国家或地区所高度重视的问题。

目前关于盐胁迫和作物关系的文献很多,但大多集中于作物的耐盐性、灌溉制度、灌溉方式和灌溉水质对盐渍化作物的影响等方面^[1-5]。关于盐渍化与持续农业和生态环境之间的相互作用的研究较少。在盐渍化环境中作物稳定产量的维持或许可以通过水肥调控及适当的耕作管理措施达到。在这方面,研究农田盐渍化对土壤理化性状和作物农艺性状影响,或许会对盐渍化农业提出一个有效的农田管理方案。基于此,本试验采用大田试验并沿袭当地农业种植习惯,通过一个生长季,研究了不同盐渍化阶段土壤理化性状和作物地上、地下部分生长动态特征,进而为通过农业综合调控措施对土壤盐分进行调控、充分利用盐渍土资源、促进农业可持续性发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于甘肃省河西走廊中部的临泽县草地生态试验站,海拔 1 390 m,地理位置为 100°02'E, 39°15'N, 面积 280 hm², 属典型的大陆性荒漠气候类型。年均温 7.6℃, 最高温 39.1℃(7 月), 最低温 -28℃(1 月), 年均风速 2.9 m·s⁻¹, 大于 8 级的大风日数 21.7 d; 年降水量 121.51 mm, 7—9 月降水占全年降水量的 64.7%; 年蒸发量 2 337.6 mm, 是降水量的 20 多倍; 干燥度 5.08, 无霜期 179 d。地下水埋深 1.5~2.0 m, 浅层水(2 m)矿化度为 2.68 g·L⁻¹, 深层水(100 m)矿化度为 0.37 g·L⁻¹。地带性土壤属灰棕漠土, 表层为风沙土, 部分地段为盐渍土, 分布面积 200 hm²; 从盐分成分看, 以硫酸盐为主, SO₄²⁻ 约占离子总量的 33% 以上, Mg²⁺ 占 25%, Na⁺ 占 16%, 此外含微量的 CO₃²⁻ 与 HCO₃⁻。盐分表聚强烈, 是河西盐渍化土壤的代表类型。

在水文地质条件上, 临泽县地处祁连山与合黎山的山前倾斜盆地, 形成冲积、洪积地带。盆地内地质基岩构造与风化裂隙发达, 促使祁连山的冰雪融水和降水渗入裂隙, 汇集于沟谷、河床, 排泄到冲积平原, 以地表径流及地下潜流和沿途渗漏等形式汇集到盆地, 形成埋深达 5~200 m 的较丰富的地下水, 甚至溢出地表成泉, 有的地区由于压差造成自喷。

1.2 试验设计

试验于 2011 年 4—9 月进行。由于苜蓿和大麦是河西走廊盐渍化农田的主要种植作物, 因此选取这两种作物地为研究对象。依据国际上采用的作物生长状况与土壤电导率关系的盐度分类标准^[6], 在两种农田内, 将盐渍化处理划分为 4 个盐渍化梯度, 分别为轻度(S1), 中度(S2), 重度(S3)盐渍化农田和弃耕地, 其土壤孔隙电导率(EC_p)值分别为 2~4, 4~8, 8~16 dS·m⁻¹ 和 >16 dS·m⁻¹, 非盐渍化农田被设置为对照处理(CK)。在 2011 年 4 月各梯度样地被选定, 选择标准为作物出苗情况结合 0~10 cm 土层土壤孔隙电导率(EC_p)。各梯度样地随机排列, 每个梯度 3 块重复样地, 共 27 块样地。各梯度土壤盐度见表 1。

供试材料紫花苜蓿金皇后的播种量为 5.25 kg·hm⁻², 播种期为 2010 年 9 月 20 日, 2011 年 6 月 22 日, 7 月 14 日, 9 月 16 日刈割 3 茬。各梯度播前施磷酸二铵 225 kg·hm⁻², 尿素 75 kg·hm⁻²。大麦甘啤 4 号的播种量为 3.75 kg·hm⁻², 播种期为 2011 年 3 月 12 日, 收获期为 7 月 22 日。各梯度播前施磷酸二铵 375 kg·hm⁻², 尿素 75 kg·hm⁻², 播后 4~8 周, 追施尿素 300 kg·hm⁻²。田间管理与大田一致。在 2010 年 11 月, 苜蓿和大麦地各梯度灌冬水 100 m³·hm⁻²。2011 年生长季, 大麦整个生育期灌水一次, 灌水时间为 5 月下旬—6 月上旬。苜蓿地整个生育期灌水四次, 灌水时间分别为 5 月下旬—6 月上旬、6 月下旬—7 月上旬、7 月下旬—8 月上旬和 8 月下旬—9 月上旬。每次灌水 100 m³·hm²。灌水方式为渠灌。

1.3 测定项目及方法

作物生长发育状况调查: 每梯度选长势一致的植株挂牌标记, 分别在苜蓿、大麦的各生长期取生长状态一致的植株 10 株, 苜蓿测量株高、主枝叶片数、主茎节数、主茎粗、主根粗、分枝数、主枝长、侧枝最大长和主根长。大麦测量株高、主茎粗、分蘖数、穗长、每穗籽粒数, 并按不同部位分开, 于 60℃ 烘干后测各部分器官干物重。

表 1 不同盐渍化梯度土壤剖面含盐量的均值
Table 1 The soil salinity average (EC_p) of different salinization gradients in different soil profiles/($dS \cdot m^{-1}$)

土层 Soil depth /cm	大麦 Barley				弃耕地 Abandoned field	苜蓿 Alfalfa				弃耕地 Abandoned field
	CK	S1	S2	S3		CK	S1	S2	S3	
0~5	1.40	2.76	4.92	9.88	20.65	1.62	2.47	5.53	10.73	24.74
5~10	1.77	2.92	3.56	4.81	14.20	1.87	2.35	7.39	10.02	16.57
10~20	2.27	2.80	2.98	4.21	11.13	1.99	2.76	6.79	6.62	11.98
20~40	2.58	3.31	3.56	3.92	18.46	2.29	2.75	5.83	6.35	16.56
40~60	2.55	2.96	2.42	3.53	15.85	2.45	2.90	6.24	5.93	16.80
60~80	2.23	1.88	1.64	3.77	17.82	2.68	3.06	6.08	5.63	16.45
80~100	2.04	2.50	1.97	3.23	17.20	2.94	3.16	5.54	5.70	14.92
100~120	2.03	2.30	1.95	3.09	9.52	3.11	3.28	5.25	6.25	10.31
平均值 Mean	2.11	2.68	2.87	4.56	15.60	2.37	2.84	6.08	7.16	16.04

产量分析:苜蓿在开花初期,取每个梯度内 1 m × 1 m 样方齐地面刈割,测定鲜草产量;大麦取每个梯度内 1 m × 1 m 样方齐地面刈割,分别测定籽粒和秸秆鲜重。

土壤容重:在野外用挖取剖面,在每个剖面 0~5,5~10,10~20,20~40,40~60,60~80,80~100 和 100~120 cm 处用环刀法测定,每层 3 次重复。土壤温度用 WET sensor 测定。

1.4 数据统计

利用 Excel 和 SPSS15.0 进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 农田盐渍化对土壤理化性状的影响

2.1.1 土壤容重和孔隙度 土壤容重是土壤紧实度的指标之一,它与许多土壤物理性能如孔隙度、渗

透率、持水、导热性能等密切相关^[7]。容重小,表明土壤疏松多孔,结构性良好^[8]。不同盐渍化梯度土壤容重测定结果见图 1。

从图 1a 可看出,在苜蓿地,与 CK 相比,不同盐渍化梯度 0~20 cm 土层中土壤容重分别增加了 3%,4.54%,8.62%,9.96%;20~60 cm 土层土壤容重的顺序分别为 S3>S1>CK>S2>弃耕地。在大麦地,与 CK 相比,不同盐渍化梯度 0~20 cm 土层中土壤容重分别增加 -1%,10.92%,6.19%,10.9%;20~60 cm 土层土壤容重的顺序分别为 S3>S2>CK>S1>弃耕地。

2.1.2 土壤温度 不同盐渍化梯度土壤温度测定结果见图 2。在大麦地,抽穗期 5、10、20 cm 土层处,土壤温度沿盐渍化梯度降低;其中,与 CK 相比,在 5 cm 土层处,不同盐渍化梯度土壤温度分别下降

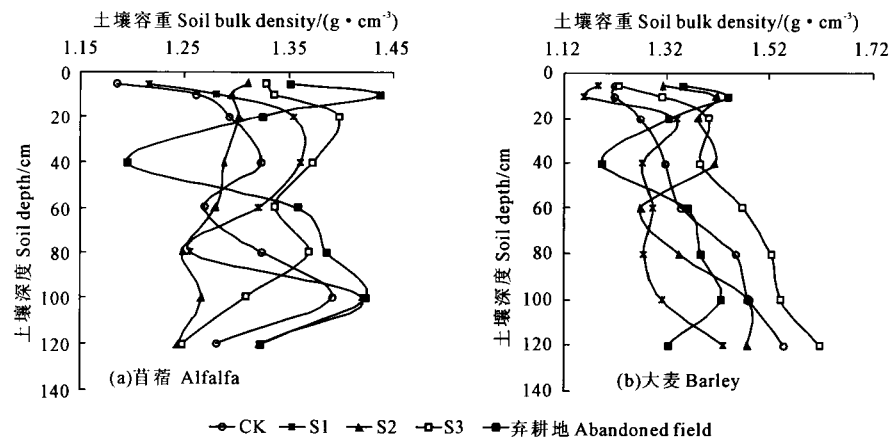


图 1 不同盐渍化梯度土壤容重的剖面垂直变化

Fig.1 The alternation of soil bulk density in soil profile under different salinization gradients

2.1℃,3.27℃,3.43℃和 4.1℃。在苜蓿地,CK 在 5、10、20 cm 土层处土壤温度均低于盐渍化农田,最大土温出现在 S2 和 S3,沿盐渍化梯度增加,土温呈低一高一低波动。

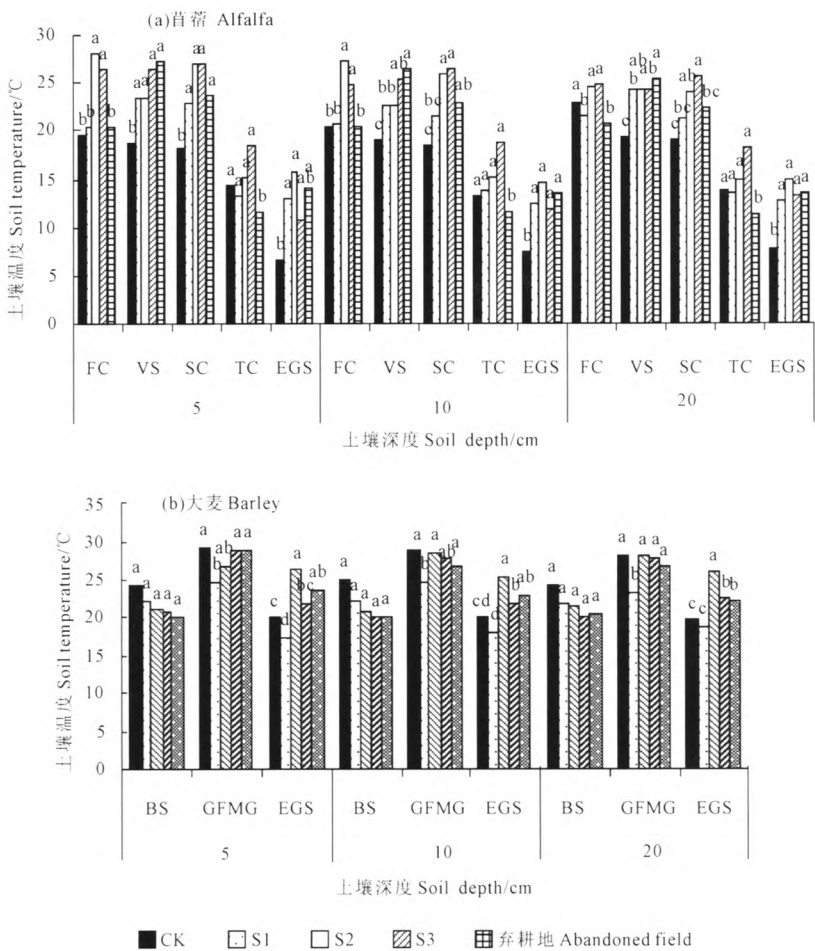


图 2 不同盐渍化梯度在 5、10、20 cm 土层处的土壤温度 (14:00 ~ 18:00 pm)

Fig.2 The soil temperature in the depth of 5 and 10 and 20 cm at 14:00 ~ 18:00 pm in different salinization gradients
注:FC: 第一茬, VS: 营养生长期, SC: 第二茬, TC: 第三茬, EGS: 生长季结束. BS: 孕穗期, GFMG: 灌浆成熟期. 同一生育期内带有相同字母的值之间没有显著差异 ($P > 0.05$).
Note:FC: First-cut, VS: Vegetative stage, SC: Second-cut, TC: Third-cut, EGS: End of growth season. BS: Booting stage, GFMG: Grain filling and mature stage. Values in same growth stage with the same letter had no significant difference at 0.05 level.

2.2 不同盐渍化梯度土壤养分的变化

2.2.1 有机质、全氮和全磷 土壤有机质含量是决定土壤养分贮量和供应水平的主要因素,也是衡量土壤质量的重要指标之一^[9-11]。从表 2 可以看出,0~20 cm 土层,随着盐渍化梯度的增加有机质含量显著降低,且 CK 低于 S1。另外,上层(0~10 cm)土壤有机质降低速率稍快于下层(10~20 cm)。

土壤氮和磷主要来自于有机质的分解^[7],因而土壤中全氮和全磷的变化趋势与土壤有机质相似(表 2)。

2.2.2 速效养分 从表 2 可以看出,两个土层碱解氮、速效磷和速效钾随盐渍化梯度的增加没有明显的改变。

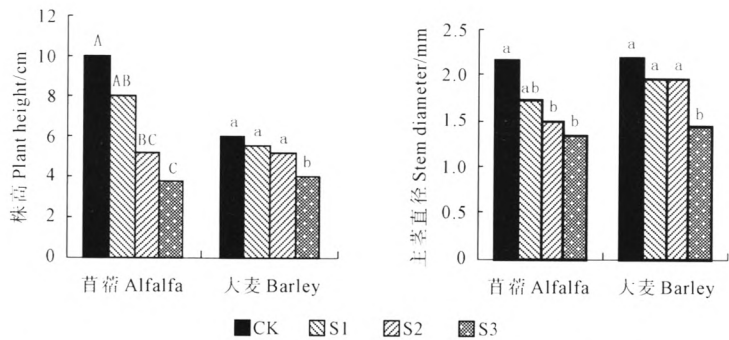
2.3 土壤盐渍化对作物茎、根生长和其它农艺性状的影响

在苗期,植株高度和主茎粗受盐渍化影响。与 CK 相比,在不同盐渍化梯度,苜蓿的株高(图 3)降低了 19.9%,48.96%,63.18%;主茎粗降低了 20.37%,30.09%和 37.96%;大麦株高和主茎粗(图 3)分别降低了 8.15%,13.81%,34.28%和 9.59%,10.5%,34.25%。这说明土壤盐渍化对苜蓿的影响大于大麦。方差分析表明,在苜蓿地,CK 与 S2 和 S3 间的株高和主茎粗差异显著;而大麦地,CK、S1 和 S2 分别与 S3 间的株高和主茎粗差异显著 ($P < 0.05$)。

表 2 盐渍化过程中土壤养分的变化
Table 2 The soil nutrients changes in salinization

作物 Crop	土壤深度 Soil depth /cm	盐渍化 梯度 Salinization gradients	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (K ₂ O) /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (P ₂ O ₅) /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali- hydrolyzable nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (P ₂ O ₅) /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (K ₂ O) /(mg·kg ⁻¹)
苜蓿 Alfalfa	0~10	CK	11.74ab	0.66a	15.00a	1.94a	49.44a	34.98a	136.67c
		S1	13.41a	0.73a	14.33a	2.04a	54.40a	43.53a	143.33c
		S2	11.05ab	0.70a	12.67b	1.56b	33.73b	30.44a	510.00ab
		S3	9.73bc	0.58ab	12.33b	1.56b	28.54bc	40.40a	496.67b
		弃耕地 Abandoned field	8.23c	0.46b	11.00c	1.42c	21.53c	36.58a	780.00a
苜蓿 Alfalfa	10~20	CK	9.33ab	0.53ab	14.67a	1.55ab	37.22a	17.07b	106.67b
		S1	10.89a	0.60a	14.00a	1.65a	43.32a	21.00ab	103.33b
		S2	9.81ab	0.58a	12.67b	1.35bc	27.06b	18.29b	423.33a
		S3	8.49ab	0.46ab	12.00bc	1.44abc	27.00b	33.87a	420.00a
		弃耕地 Abandoned field	7.27b	0.39b	11.00c	1.29c	19.65b	16.31b	496.67a
大麦 Barley	0~10	CK	15.84a	1.08a	12.67ab	1.45ab	63.76a	12.41b	200c
		S1	13.62ab	0.87ab	13.00a	1.55a	57.60ab	19.32ab	226.67c
		S2	11.68abc	0.69ab	12.33bc	1.28c	46.63ab	7.52b	416.67b
		S3	9.19bc	0.57b	12.00c	1.34bc	37.79bc	11.34b	446.67b
		弃耕地 Abandoned field	8.23c	0.46b	11.00d	1.42abc	21.53c	36.58a	780a
大麦 Barley	10~20	CK	10.45b	0.63b	13.00a	1.39ab	44.43b	3.02b	246.67bc
		S1	16.25a	0.94a	13.00a	1.61a	68.57a	10.31a	220c
		S2	10.85b	0.65b	11.33bc	1.29b	37.54bc	3.28b	376.67abc
		S3	8.44b	0.56b	12.33ab	1.32b	36.33bc	3.48b	393.33ab
		弃耕地 Abandoned field	7.27b	0.39b	11.00c	1.29b	19.65c	16.31a	496.67a

注:同一列内带有相同字母的值之间没有显著差异($P>0.05$)。
Note: Values in each column with the same letter had no significant difference at 0.05 level.



注:同一作物内带有相同字母的值之间没有显著差异($P>0.05$),大写字母表示差异极显著($P<0.01$),小写字母表示差异显著($P<0.05$)
Note: Values in same crop with the same letter had no significant difference at 0.05 level. Capital letters indicated very significant difference at $P<0.01$; small letters indicated significant difference at $P<0.05$.

图 3 盐渍化对大麦苗期和苜蓿返青期株高和主茎直径的影响

Fig.3 The effect of salinization on plant height and stem diameter of barley at seedling stage and of alfalfa at returning green stage

苜蓿根系受土壤盐渍化的影响见表 3。其 CK 处理植株根系最发达,但沿着盐渍化梯度而逐渐降
低。如图 4 所示,在营养生长期,与 CK 相比,S1、S2 和 S3 苜蓿主根直径显著降低了 32.58%,36.77%,

表 3 土壤盐渍化对苜蓿各生育期农艺性状和干物质积累的影响
Table 3 The effect of salinization on agronomic traits and dry matter accumulations of alfalfa at different growth stages

生育期 Growing stage	盐渍化 梯度 Salinization gradients	总干重 Total dry weight /(g·plant ⁻¹)	器官干重/(g·plant ⁻¹) Dry weight of tissues			株高 Plant height /cm	叶片数 Leaves number per plant	主茎直径 Stem diameter /mm	分枝数 Twigs per plant	主枝长 Length of main branch /cm	最大侧枝长 Length of secondary branch/cm	主枝节数 Node number of main branch	主根长 Length of tap root /cm	主根直径 Diameter of tap root /mm
			叶 Leave	茎 Stem	根 Root									
营养生长期 Vegetative stage	CK	6.78a	2.25a	3.32a	1.21a	27.02A	70.59A	2.30A	3.78a	32.68a	29.99a	9.15a	28.67a	3.83a
	S1	3.68b	1.05b	1.69b	0.94ab	24.02A	56.33AB	1.91AB	2.66ab	24.52b	21.79b	9.15a	24.22ab	2.58b
	S2	2.33b	0.69b	1.03b	0.62bc	15.40B	47.89B	1.73AB	2.23b	16.41c	13.63c	8.33a	24.11ab	2.42b
	S3	1.76b	0.68b	0.77b	0.31c	14.75B	43.11B	1.42B	2.06b	16.31c	13.28c	7.74a	20.44b	1.84b
初花期(第一茬) Early blooming (The first-cut)	CK	9.13a	2.65a	4.65a	1.83a	74.07A	328.53a	3.17A	3.96a	71.93A	68.53A	15.96a	42.33a	6.13A
	S1	5.60b	1.38b	3.18b	1.04ab	51.23B	194.11ab	2.56AB	3.26ab	50.91B	45.22B	13.37b	35.76b	4.49B
	S2	2.75bc	0.87bc	1.17c	0.71b	35.63C	179.17ab	1.87B	2.81b	36.70C	27.24C	10.81c	29.13b	3.61BC
	S3	1.61c	0.47c	0.46d	0.68b	20.47D	125.33b	1.83B	2.70b	21.80D	11.29D	9.19c	24.90c	2.84C
营养生长期 Vegetative stage	CK	9.94a	2.35a	4.73a	2.86a	49.26a	113.40a	2.73a	8.10a	49.13a	44.80a	9.57a	56.44a	8.79a
	S1	6.71a	1.57ab	3.06ab	2.08ab	43.69a	106.37a	2.59a	6.47a	43.87a	38.57a	9.17a	50.96a	7.83a
	S2	3.96b	0.84b	1.66bc	1.46b	35.09b	73.90b	1.89b	6.13a	34.07b	29.07b	7.93a	41.25b	6.12b
	S3	2.73b	0.65b	1.01c	1.07b	20.34c	69.60b	1.33c	5.97a	21.83c	17.77c	5.47b	35.66c	4.49c
初花期(第二茬) Early blooming (The second-cut)	CK	37.12a	8.32a	17.85a	10.95a	78.00A	333.42a	2.98a	11.98a	74.00a	68.00a	18.00a	78.00a	9.34a
	S1	19.14ab	6.36b	8.15b	4.63b	66.90B	245.00b	2.93a	10.65a	51.00b	43.44b	14.22b	70.67b	8.33b
	S2	12.45bc	3.97bc	5.99bc	2.49bc	63.97C	239.33bc	2.38b	9.11ab	36.90c	28.20c	11.09c	67.00b	8.16b
	S3	9.49c	3.01c	4.83c	1.65c	51.24D	224.47c	1.56c	6.43b	25.44d	13.40d	9.33c	61.00c	7.91c
营养生长期 Vegetative stage	CK	22.05a	2.62a	5.87a	13.56a	28.80a	89.67a	2.68a	13.23a	32.44a	28.67a	6.11a	80.99a	11.30a
	S1	11.29ab	1.56a	3.39ab	6.33b	20.27b	76.50b	1.89b	12.70a	27.33b	24.78b	5.89b	76.45a	10.32a
	S2	8.10b	1.55a	1.41b	5.14bc	16.31c	61.33c	1.84b	9.67b	21.00c	17.17c	5.83b	70.42b	8.27b
	S3	6.96b	1.54a	1.18b	4.24c	10.89d	54.56d	1.33c	9.13b	19.61c	11.30d	4.14c	66.00b	8.01b
初花期(第三茬) Early blooming (The third-cut)	CK	37.35a	7.04a	16.14a	14.17a	78.79a	178.00a	2.98a	26.11a	69.90a	62.97a	10.40a	82.56a	13.12a
	S1	23.10b	5.69ab	7.91b	9.50ab	63.88b	162.80a	2.93a	15.67b	62.07a	55.63a	9.57a	81.89a	10.37ab
	S2	17.27bc	3.72bc	5.44bc	8.11b	39.51c	136.70b	2.38b	10.33b	47.03b	41.73b	9.13ab	79.94a	8.49b
	S3	13.17c	2.64c	4.04c	6.49b	32.34d	107.40b	1.57c	9.46b	33.63c	27.43c	7.70b	70.81a	8.27b

注:同一列内带有相同字母的值之间没有显著差异($P>0.05$),大写字母表示差异极显著($P<0.01$),小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Values in each column with the same letter had no significant difference at 0.05 level, capital letters indicated very significant difference at $P<0.01$, small letters indicated significant difference at $P<0.05$.

51.92%,主枝长分别降低24.97%,49.79%,50.09%,最大侧枝长分别降低27.36%,54.56%和55.73%(图4a)。第一茬苜蓿与CK相比,S1、S2和S3的株高显著降低了30.84%,51.9%,72.36%,主枝长分别降低了29.22%,48.98%,69.69%,最大侧枝长降低了34.01%,60.25%和83.53%(图4b)。第二茬苜蓿与CK相比,S1、S2和S3主枝长和最大侧枝长显著降低了31.08%,50.14%,65.62%和36.12%,58.53%,80.29%(图4c)。第三茬苜蓿与CK相比,S1、S2和S3主根直径显著降低了20.96%,35.29%,36.97%,株高分别降低18.92%,49.85%,58.95%,分枝数显著降低39.98%,60.44%和

63.77%(图4d)。

从表4和图4可以看出,在大麦分蘖和拔节期,与CK比,S1、S2和S3大麦株高和主茎粗显著降低了25.79%,36.49%,48.36%和20.85%,23.02%,33.14%(图4e);在孕穗期,与CK比,S1、S2和S3大麦株高和主茎粗显著降低了27.43%,52.55%,69.83%和23.26%,24.31%,32.33%(图4f);在成熟期,与CK比,S1、S2和S3大麦株高显著降低了4.93%,43.87%,49.34%,主穗长显著降低9.82%,48.53%,53.3%,穗粒数显著降低12.15%,50.07%和54.73%(图4g)。这说明土壤盐渍化显著影响大麦营养生长期的茎生长和灌浆成熟期的穗长和穗粒数。

表 4 土壤盐渍化对大麦各生育期农艺性状和干物质积累的影响

Table 4 The effect of salinization on agronomic traits and dry matter accumulations of barley at different growth stages

生育期 Growth stage	盐渍化 梯度 Salinization gradients	总干重 dry weight /(g·plant ⁻¹) Total	器官干重/(g·plant ⁻¹) Dry weight of tissues				株高 Plant height /cm	叶片数 Leaves number per plant	主茎直径 Stem diameter /mm	主穗长 Main ear length /cm	次穗长 Secondary ear length /cm	主穗籽粒数 Number of grains per main ear	次穗籽粒数 Number of grains per secondary ear
			叶 Leave	茎 Stem	根 Root	穗 Ear							
分蘖拔节期 Tillering and jointing stage	CK	2.49a	0.95a	0.55a	0.99a		16.17a	7.62a	2.77a				
	S1	1.96a	0.8ab	0.39ab	0.76a		12.00b	6.10a	2.19a				
	S2	1.67a	0.67b	0.35b	0.66a		10.27b	6.07a	2.13a				
	S3	1.37b	0.43c	0.34b	0.59a		8.35c	4.23a	1.85a				
孕穗期 Booting stage	CK	8.39a	2.39a	4.07a	1.92a		57.74a	13.90a	2.87a				
	S1	5.94ab	1.26ab	2.89a	1.79a		41.90b	11.80a	2.20ab				
	S2	5.14ab	1.22b	2.21a	1.71a		27.40bc	10.76a	2.17b				
	S3	2.40b	1.03b	0.65a	0.72b		17.42c	8.68a	1.94b				
灌浆成熟期 Grain filling and mature stage	CK	6.54a	0.46a	1.74a	0.99a	3.35a	72.07a	7.34a	2.83a	7.13A	4.17a	20.83a	13.20a
	S1	5.02a	0.4ab	1.22b	0.71ab	2.69a	68.52a	5.90a	2.53b	6.43A	2.00a	18.30b	6.00a
	S2	3.40b	0.29b	0.89bc	0.47bc	1.74b	40.45b	5.57a	2.35c	3.67B	0.97a	10.40c	4.50a
	S3	2.42b	0.28b	0.62c	0.19c	1.32b	36.51b	5.53a	2.20c	3.33B	0.87a	9.43c	2.72a

注:同一列内带有相同字母的值之间没有显著差异($P>0.05$)。大写字母表示差异极显著($P<0.01$),小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Values in each column with the same letter had no significant difference at 0.05 level, capital letters indicated very significant difference at $P<0.01$, small letters indicated significant difference at $P<0.05$.

2.4 土壤盐渍化对作物总干重和器官干重的影响

土壤盐渍化对苜蓿和大麦干物质积累和分配的影响如图5和表3,表4所示。苜蓿营养生长期,与CK比S1、S2和S3的苜蓿叶和茎的干重分别降低了53.33%,69.33%,69.78%和48.89%,69.1%,76.81%(图5a);第一茬苜蓿,与CK比,S1、S2和S3的叶和茎的干重分别降低了47.92%,67.17%,82.26%和31.61%,74.84%,90.11%(图5b);第二茬苜蓿,与CK比,S1、S2和S3的苜蓿茎和根的干重分别降低了54.34%,66.44%,72.94%和57.73%,77.31%,84.94%(图5c);第三茬苜蓿,与CK比,S1、S2和S3的苜蓿茎的干重降低了50.99%,66.29%,74.97%(图5d)。这说明,盐渍化对苜蓿干物质积

累的影响主要集中在前两茬,并且对茎生长的影响最大。

在大麦分蘖和拔节期,与CK比,S1、S2和S3大麦茎和根干重降低了27.45%,36.36%,38.18%和23.39%,33.57%,39.72%(图5e);在孕穗期,与CK比,S1、S2和S3大麦叶和茎干重降低了47.46%,49.04%,57.21%和28.99%,45.7%,84.03%(图5f);在灌浆和成熟期,与CK比,S1、S2和S3大麦茎降低了29.89%,48.85%,64.37%;根分别降低28.36%,52.57%,80.22%,穗干重分别降低19.63%,48.01%,60.56%(图5g)。这说明,在分蘖拔节期后土壤盐渍化对大麦干物质积累的影响较大。

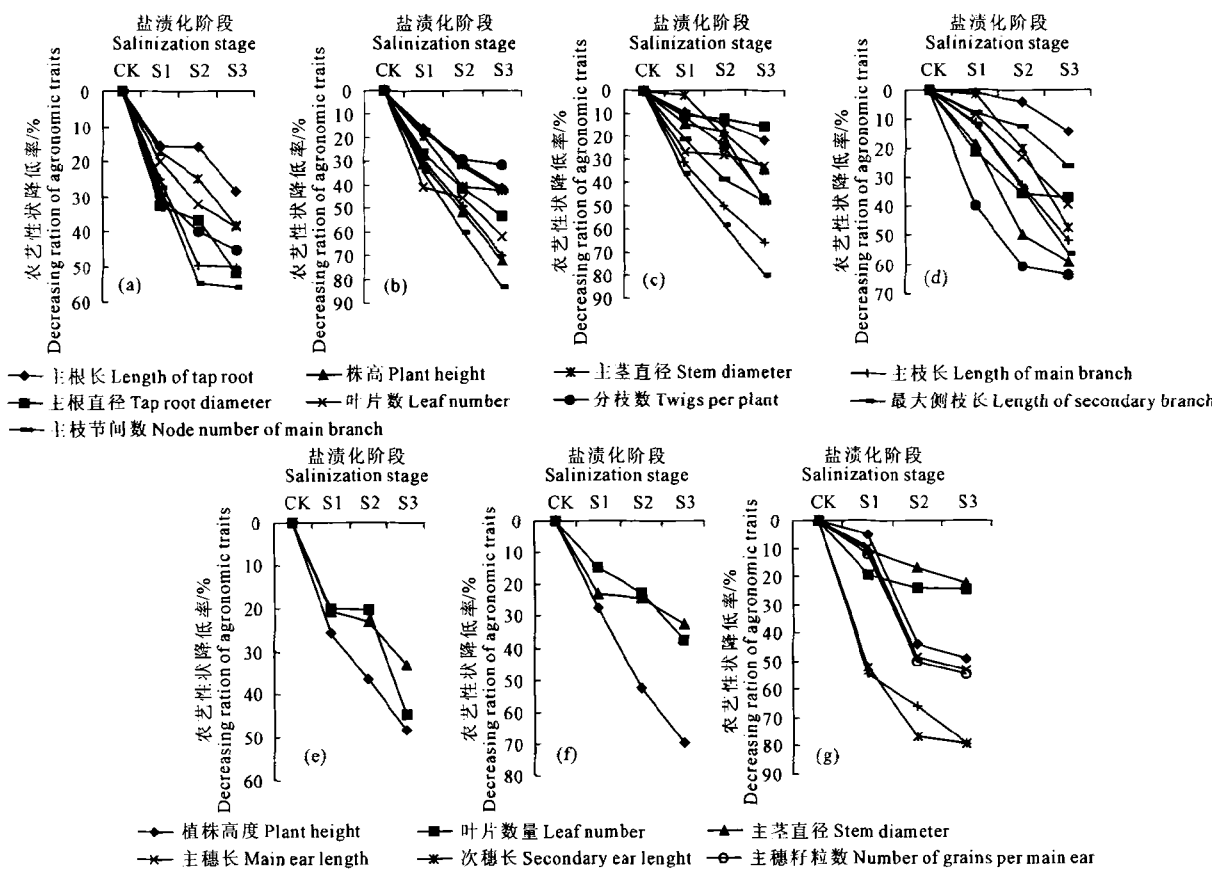


图 4 不同盐渍化阶段作物农艺特征的降低率

Fig.4 The decreasing ratio of plant agronomic traits at different salinization stages

注:苜蓿:(a)营养生长期,(b)第一茬,(c)第二茬,(d)第三茬;大麦:(e)分蘖和拔节期,(f)孕穗期,(g)灌浆成熟期。下同。

Note: Alfalfa: (a) Vegetative stage, (b) First-cut, (c) Second-cut, (d) Third-cut; Barley: (e) Tillering and jointing stage, (f) Booting stage, (g) Grain filling and mature stage. Hereinafter the same.

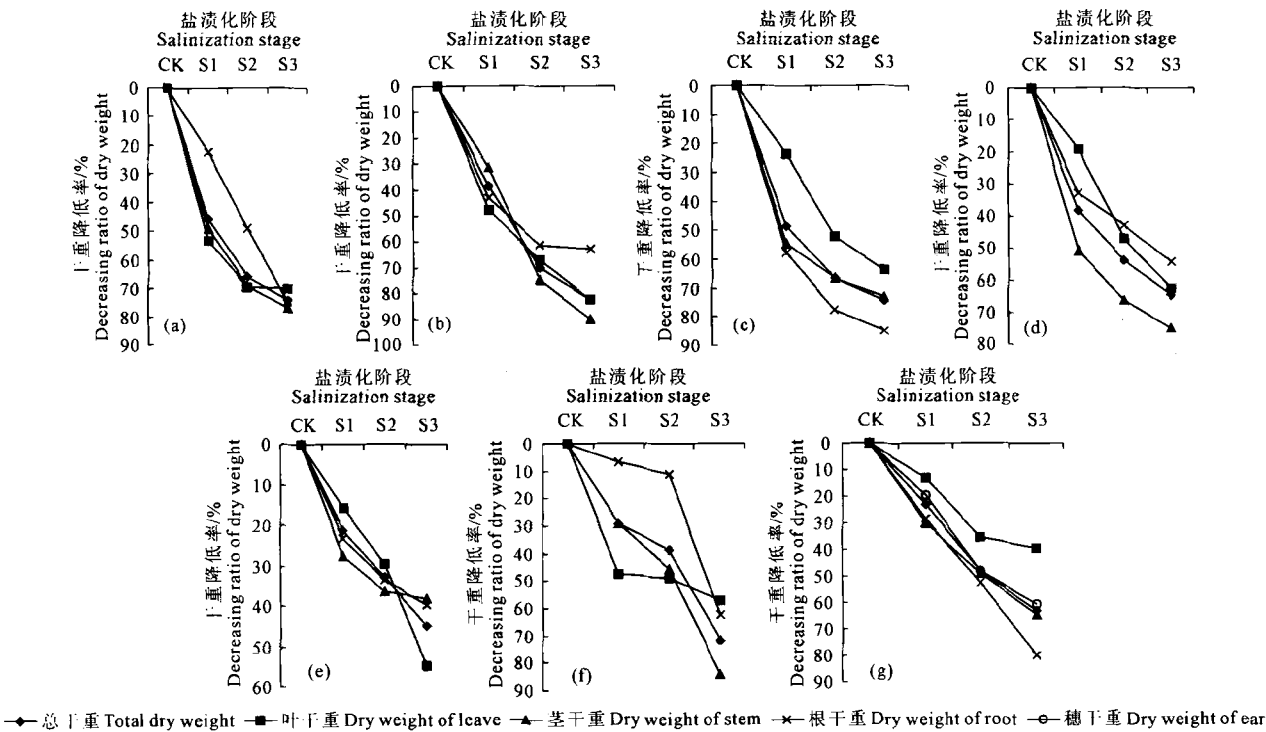


图 5 不同盐渍化阶段作物总干重和各器官干重的降低率

Fig.5 The decreasing ratio of plant dry weight and dry weight of tissues at different salinization stages

在根/茎干重比上,两种作物的根/茎干重比随盐渍化梯度的增加而逐渐增加。这说明盐渍化对作物地上部分生长的影响大于地下部分。方差分析表明,在苜蓿营养生长期,第一茬和第二茬根/茎干重比在不同盐渍化梯度间差异不显著($P > 0.05$),在第三茬根/茎干重比在 CK、S1 和 S2 分别与 S3 间差异显著($P < 0.05$);大麦在拔节期,根/茎干重比在不同盐渍化梯度间差异不显著。

2.5 产量和产量构成因素的相关分析

第一、二茬和第三茬苜蓿,与 CK 相比,S1、S2 和 S3 苜蓿的产量降低了 51.49%,67.23%,88.17%;30.93%,59.48%,72.36% 和 17.25%,42.17%,70.77%(表 5)。分析表明,株高、主枝长、最大侧枝

长和主根直径的显著降低分别与 3 个茬次的产量损失相关(r 分别为 0.914,0.893,0.904,0.881, $P < 0.01$)(表 6)。

大麦籽粒产量和秸秆产量,在 CK 和 S2 和 S3 间的差异达到显著水平。与 CK 比,S1、S2 和 S3 大麦的籽粒产量和秸秆产量降低了 4.69%,53.87%,59% 和 0.26%,58.16%,60.53%(表 5)。分析表明,籽粒产量和主穗长、每穗粒数及每穗籽粒干重有显著的相关性(r 分别为 0.86,0.74,0.74, $P < 0.01$)。这说明,盐渍化对大麦的开花、孕穗及灌浆有显著的影响。大麦秸秆产量和株高、主茎直径有显著的相关性($r = 0.88, p < 0.01; r = 0.66, p < 0.05$)(表 7)。

表 5 不同盐渍化梯度苜蓿和大麦的产量
Table 5 The yields of alfalfa and barley in different salinization gradients

盐渍化梯度 Salinization gradients	大麦 Barley		苜蓿 Alfalfa		
	籽粒产量 Grain yield	秸秆产量 Straw yield	第一茬 First-cut	第二茬 Second-cut	第三茬 Third-cut
	/(g·m ⁻²)	/(g·m ⁻²)	/(g·m ⁻²)	/(g·m ⁻²)	/(g·m ⁻²)
CK	745.71a	2533.3a	2656.5a	3002.7a	2086.7a
S1	710.76a	2526.7a	1288.5b	1803.6b	1726.7a
S2	344.03b	1060b	870.65b	1216.7c	1206.7b
S3	306.16b	1000b	314.18c	830.0c	610c

注:同一列内带有相同字母的值之间没有显著差异($P < 0.05$) (LSD 法)。
Note: Values in each column with the same letter are not significantly different at the 0.05 level.

表 6 苜蓿产量和产量因素的偏相关系数
Table 6 The partial correlation coefficient between yield and yield parameters in alfalfa

项目 Item	茬次 Cutting time	株高 Plant height /cm	主枝长 Length of main branch /cm	最大侧枝长 Length of secondary branch /cm	主枝节数 Node number of main branch	主根直径 Diameter of tap root /mm	分枝数 Twigs per plant	叶片数 Leaves number per plant	主茎直径 Stem diameter /mm
鲜草产量 Shoot yield /(g·m ⁻²)	第一茬 First-cut	0.92**	0.94**	0.92**	0.83**	0.92**	0.73**	0.63*	0.69*
	第二茬 Second-cut	0.86**	0.87**	0.89**	0.82**	0.90**	0.37	0.74**	0.80**
	第三茬 Third-cut	0.97**	0.87**	0.90**	0.78**	0.82**	0.83**	0.47	0.82**

注:“**”表示极显著相关($P < 0.01$),“*”表示显著相关($P < 0.05$)。
Note: “**” means very significant correlation at the 0.01 level, “*” means significant correlation at the 0.05 level.

表 7 大麦产量和产量因素的偏相关系数
Table 7 The partial correlation coefficient between yield and yield parameters in barley

产量 Yield	株高 Plant height /cm	主茎节数 Node number of basal stem	分蘖数 Tiller number	主穗长 Main ear length /cm	主穗籽粒数 Number of grains per main ear	每株籽粒干重 Dry weight of grains per plant /g	主茎直径 Stem diameter /mm	次穗长 Secondary ear length /cm	次穗籽粒数 Number of grains per secondary ear
籽粒产量 Grain yield	0.92**	0.70*	0.40	0.86**	0.74**	0.74**	0.72**	0.28	0.26
秸秆产量 Straw yield	0.88**	0.75**	0.45	0.74**	0.64**	0.65*	0.66*	0.27	

注:“**”表示极显著相关($P < 0.01$),“*”表示显著相关($P < 0.05$)。
Note: “**” means very significant correlation at the 0.01 level, “*” means significant correlation at the 0.05 level.

3 结 论

在农田盐渍化中,土壤质量随着盐渍化的发展发生一定的变化趋势。在0~20 cm土层,土壤容重随盐渍化的发展逐渐增加,土壤孔隙度降低;土壤有机质显著降低,并且0~10 cm土层降低率快于10~20 cm土层,说明土壤养分储存和供应水平趋于降低,土壤结构恶化,质量下降。

在盐渍化过程中,在不同盐渍化梯度和不同生育期,盐胁迫对作物农艺性状和产量的影响不同。对于农作物,盐渍化程度等于或高于中度盐渍化水平时,大麦植株的穗长、穗粒数和秸秆重受到显著影响;在开花、孕穗和灌浆期的盐度既会降低籽粒产量也降低秸秆产量。与农作物相比,盐渍化程度等于或高于轻度盐渍化水平时,牧草植株的株高、主侧枝长和主根直径会受到影响,进而导致牧草产量的降低。因此,在农业生产中,应根据两种作物在不同盐渍化梯度不同生育期的受害状况进行相应的水盐调控和耕作管理,以实现盐渍化农田作物产量的维持和增加。

参 考 文 献:

- [1] 高扬帆,吕文彦,王丙丽,等.盐胁迫对高羊茅种子萌发及幼苗生长的影响[J].安徽农业科学,2006,34(22):5781-5783.
- [2] 臧波,向波,张功亚.油田次生盐渍化土对几种作物的影响[J].江汉石油科技,2006,16(4):60-65.
- [3] 廖震,陈金湘,廖振坤.棉花耐盐性研究现状与展望[J].作物研究,2008,22(5):460-465.
- [4] 余美,杨劲松,刘梅先,等.膜下滴灌灌水频率对土壤盐运移及棉花产量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):18-23.
- [5] 姚宝林,叶含春,孙三民,等.微咸水滴灌土壤盐分布规律与枣树耐盐性试验研究[J].节水灌溉,2010,(10):32-39.
- [6] Soil Survey Division Staff. Soil survey manual[M]. Washington, DC: In USDA Handbook 18, US Gov., 1993:437.
- [7] 苏永中,赵哈林,张铜会,等.不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤性状特征[J].中国沙漠,2002,22(4):333-338.
- [8] 徐丽恒,王继和,李毅,等.腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征[J].中国沙漠,2008,28(4):690-695.
- [9] 刘全友,童依平.北方农牧交错带土地利用类型对土壤养分分布的影响[J].应用生态学报,2005,16(10):1849-1852.
- [10] Lal R. Carbon Sequestration in Drylands[J]. Annals of Arid Zone, 2000,39(1):1-10.
- [11] 谭明亮,段争虎,陈小红.流沙地恢复过程中土壤特性演变研究[J].中国沙漠,2008,28(4):685-689.
- [12] Wang C, Luo X, Tian Y, et al. Biphasic effects of lanthanum on *Vicia faba* L. seedlings under cadmium stress, implicating finite antioxidation and potential ecological risk[J]. Chemosphere, 2012,86(5):530-537.
- [13] Wang C R, Xiao J J, Tian Y, et al. Antioxidant and prooxidant effects of lanthanum ions on *Vicia faba* L. seedlings under cadmium stress, suggesting ecological risk[J]. Environ Toxicol Chem, 2012,31(6):1355-1362.
- [14] 陈志远,王国栋,邸丽俊,等.低温冻害对蚕豆幼苗生理生化特性的影响及 RAP-PCR 指纹分析[J].干旱地区农业研究,2011,29(4):6-12.
- [15] 张苗苗,韩善华,王亚男,等.硒对蚕豆胚根抗氧化酶系统的影响[J].四川师范大学学报(自然科学版),2012,33(2):239-242.
- [16] 武永军,项燕,曹让,等.干旱胁迫下蚕豆叶片抗氧化酶活性的变化[J].干旱地区农业研究,2009,27(5):188-190.
- [17] 郝再彬,苍晶,徐仲.植物生理实验[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [18] 张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导(第三版)[M].北京:高等教育出版社,2005.
- [19] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. Plant Cell Physiol, 1981,22(5):867-880.
- [20] 盛艳敏,尹金植,石德成,等.盐碱协同胁迫对向日葵抗氧化酶系统的影响[J].中国生物化学与分子生物学,2008,24(8):704-711.
- [21] Gondim F A, Gomes-Filho E, Costa J H, et al. Catalase plays a key role in salt stress acclimation induced by hydrogen peroxide pretreatment in maize[J]. Plant Physiol Biochem., 2012,56:62-71.
- [22] 何俊瑜,任艳芳,朱诚期,等.镉胁迫对镉敏感水稻突变体活性氧代谢及抗氧化酶活性的影响[J].生态环境,2008,17(3):1004-1008.
- [23] 杜世章,代其林,奉斌,等.不同浓度 NaCl 胁迫处理下豇豆幼苗抗氧化酶活性的变化[J].基因组学与应用生物学,2011,30(3):351-356.
- [24] 陈虹,张颖,方元平,等.镉对金鱼藻植株生长和抗氧化酶活性的影响[J].湖北农业科学,2012,51(5):977-980.
- [25] 李慧,王妙媛,彭立新,等.NaCl 胁迫对葫芦巴幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响[J].华北农学报,2012,27(2):185-188.
- [26] Hayat S, Hayat Q, Alyemeni M N, et al. Role of proline under changing environment: A review[J]. Plant Signal Behav, 2012,7(11):1456-1466.
- [27] 时丽冉,刘志华.干旱胁迫对苜蓿抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J].草地学报,2010,18(5):673-677.

(上接第 165 页)