紫穗槐幼苗根系形态对 NaCl 盐胁迫的响应

张佳鹏[1,2]，高 永[1,2]，党晓宏[1,2]，张 格[3]，王 涛[1]

（1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010019；2.内蒙古自治区风沙物理学重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010019；3.中国林业科学研究院 沙漠林业试验中心，内蒙古 磴口 015200）

摘 要：[目的] 探究紫穗槐幼苗根系形态对 NaCl 盐胁迫的适应特征，为盐渍化地区植被优化及恢复提供理论依据。[方法] 以 1 a 生紫穗槐幼苗为试材，分析紫穗槐幼苗株高、基径和根长、表面积、体积、根尖数等重要的根系形态特征指标。[结果] 随着盐浓度的增加，紫穗槐幼苗株高、基径和总根、中根各构型指标均呈现先升高后下降的趋势；盐浓度为 0.3%时，除细根体积外，各指标达到最大值，且均表现显著促进作用（$p<0.05$）；盐浓度达到 0.9%时，各指标受到了显著抑制（$p<0.05$）。[结论] 当盐浓度为 0.3%时，对紫穗槐根系生长有促进作用；当盐浓度达到 0.9%时，其生长明显受到抑制。

关键词：紫穗槐；盐胁迫；根系形态；植被优化

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)02-0054-05 **中图分类号**：Q945.78

文献参数：张佳鹏，高永，党晓宏，等. 紫穗槐幼苗根系形态对 NaCl 盐胁迫的响应[J]. 水土保持通报，2020,40(2):54-58. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.008；Zhang Jiapeng, Gao Yong, Dang Xiaohong, et al. Responses of root morphology of *Amorpha fruticosa* to NaCl saline stress [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(2):54-58.

Responses of Root Morphology of *Amorpha Fruticosa* to NaCl Saline Stress

Zhang Jiapeng[1,2], Gao Yong[1,2], Dang Xiaohong[1,2], Zhang Ge[3], Wang Tao[1]

(1. *College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010019, *China*; 2. *Key Laboratory of Wind and Sand Physics of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia* 010019, *China*; 3. *Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou, Inner Mongolia* 015200, *China*)

Abstract: [Objective] The adaption of *Amorpha fruticosa* through root morphological responses to saline stress was explored, in order to provide support for vegetation optimization and restoration in saline areas. [Methods] we used the annual *Amorpha fruticosa* seedlings as test materials, and analyzed plant height, basal diameter and the root morphological characteristics such as root length, surface area, volume, and number of root tips of *Amorpha fruticosa* seedlings under saline stress. [Results] As the salt concentration increases, the plant height, basal diameter, and total root and middle root configuration indexes of *Amorpha fruticosa* increased first and then decreased. When the saline concentration was 0.3%, except for the fine root volume, all other indexes reached the maximum value, and all showed significant promotion effects ($p<0.05$). When the saline concentration was 0.9%, all indicators were significantly inhibited ($p<0.05$). [Conclusion] When the saline concentration was 0.3%, the root growth of *Amorpha fruticosa* was significantly promoted; when the concentration was higher than 0.5%, the root system showed different degrees of growth declining; when the saline concentration reached 0.9%, its growth was significantly inhibited.

Keywords: ***Amorpha fruticosa***; **saline stress**; **root morphology**; **vegetation optimization**

收稿日期：2019-10-09 **修回日期**：2019-12-16

资助项目：948 项目“人工调控荒漠灌丛生态空间构型技术引进”(2015-4-22)；国家自然科学基金项目“荒漠灌丛空间构型对其‘肥岛’发育的作用机制”(41967009)

第一作者：张佳鹏(1994—)，男(汉族)，内蒙古自治区赤峰市人，硕士研究生，研究方向为荒漠化防治。Email:1136739206@qq.com。

通讯作者：高永(1962—)，男(汉族)，内蒙古自治区包头市人，教授，博士生导师，主要从事荒漠化防治研究。Email:13948815709@163.com。

当今世界土壤盐渍化日益严重,盐碱土约占陆地总面积的 30%[1],中国盐渍土总面积约 3.60×10^7 hm^2,占全国可利用土地面积的 4.88%[2],严重的制约着我国农业发展,尤其是在干旱和半干旱等生态脆弱地区土壤盐渍化现象更为严重,给当地人们的生产和生活乃至生态环境带来了严重威胁。土壤盐渍化可以通过增大土壤溶液渗透压,降低土壤透水性、透气性,降低土壤养分含量,进而影响植物正常生长,甚至会造成植物萎蔫或死亡,最终使地表植被群落退化[5],因此土壤盐渍化逐渐成为许多生态学家研究的一个热点问题[6-8]。盐胁迫下,植物根系是最早感受盐胁迫信号的首要器官,也是最直接的受害部位[9],根系在逆境下能够通过改变其形态与分布来适应不利环境[10-11],同时,植物根系能增加土壤的稳定性,较长的根系还有利于植物更大范围地吸收水分与养分[12]。所以,根的生长发育状况和活力对植物的耐盐能力至关重要。它在逆境下的分布特征和表现是植物有效吸收和利用土壤养分最直接的适应特征,植物根系系统存在着复杂的分支结构,而不同根系形态具有不同的功能[11],根尖数是根系活力的外在表现,根尖数的多少直接体现了根系的生长趋势,根系表面积能够体现植物根系与土壤的接触面积,根系体积则体现了根系在空间上的发育状况[13]。因此,采用根系分级研究框架研究盐胁迫下根系响应特征具有重要的科学意义。

紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)是豆科(Leguminosae)紫穗槐属(*Amorpha*)的一种多年生丛生灌木,生长快,根系发达,侧根多而密,具有很强的防风固沙、保持水土、改良土壤等生态作用,并且茎叶量大,营养丰富,是一种优良饲料。紫穗槐生长适应性强,耐寒、耐旱、耐湿、抗风沙[3],它可降低土壤的盐渍化程度[4]。因此,合理开发与利用紫穗槐这种特性,对盐渍土的改良具有重要作用。关于紫穗槐的研究主要集中在其育苗繁殖及栽培技术[14]、防护效益[15]等方面,对盐胁迫下紫穗槐根系形态特征的研究还比较少。为此,本研究采用盆栽试验,通过人为控制土壤盐分,研究紫穗槐幼苗根系在盐胁迫下的生长特性,旨在揭示紫穗槐幼苗根系在盐胁迫下的形态特征及适应特点,为其在盐渍化地区的推广应用提供参考,也为盐渍地区植被优化恢复提供一定的理论基础。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于 2019 年 3 月 15 日在内蒙古农业大学温室大棚进行(温棚培养条件:相对湿度为 35%～70%,温度变化为 13～30 ℃)。供试植物为一年生紫穗槐幼苗,培育用土为温室外大田土壤和营养土以 4∶1的比例混合。将紫穗槐幼苗移栽于直径 21.8 cm,高 21.7 cm 的育苗盆内,移苗浇透水后,每 3 d 浇水 1 次,每次浇水 300 ml,并定期除草,使其正常生长。为了避免湿度、温度、光照等环境条件的影响,每 7 d 对紫穗槐盆栽按照"S 型"顺序移动位置。2019 年 7 月 10 号,根据紫穗槐幼苗长势大小按 S 形排序以减少紫穗槐个体差异对试验造成的误差,并补灌到饱和后进行盐胁迫处理。有研究表明紫穗槐在根际土壤含盐量 0.3%～0.5%的范围内都能正常生长[16]。因此本试验 NaCl 盐胁迫浓度设 0,0.1%,0.3%,0.5%,0.7%,0.9%等 6 个处理,每个处理 6 个重复。采用浇灌的方式,将盐溶液浇入花盆中,为避免盐激反应,分 3 次浇灌,每次 200 ml,共施 600 ml 盐溶液,为防止盐分渗漏,育苗盆底下加垫,定期将漏液返回花盆。施盐完成后,对各处理称重记录,以后每隔 3 d 称重浇水。对照组(CK)采用等量清水浇灌。试验前紫穗槐平均基径为 5.42 mm,平均株高为 55.7 cm。

1.2　测定项目与方法

在盐胁迫处理 30 d(0.9%盐浓度下,紫穗槐叶片开始出现萎蔫并脱落)后,用自来水冲洗花盆内土壤,将根系与地上部分分开,并去除根系表面杂物,迅速带回实验室用 Epson Expression 10000XL 扫描仪获取根系的形态图像。利用 WinRhizo 根系分析软件分析根长、表面积、体积、根尖数等参数。

1.3　数据处理

利用 Excel 软件对数据进行整理和计算;利用 SPSS 19.0 统计分析软件对所测数据进行方差分析。

2　结果与分析

2.1　不同盐浓度对紫穗槐幼苗生长的影响

由表 1 可知,随着 NaCl 溶液浓度的增加,紫穗槐幼苗的基径和株高均呈先上升后下降的趋势,盐浓度为0.3%时,基径与 CK 相比显著增加了 6.8%($p<0.05$),株高与 CK 相比,增加了 7.6 cm,没有显著性差异($p>0.05$);当盐浓度为 0.5%～0.9%时,紫穗槐幼苗的基径比 CK 显著下降了 0.69 mm,0.74 mm,0.84 mm($p<0.05$),盐浓度为 0.5%和 0.7%时,紫穗槐幼苗株高分别比 CK 降低了 8.6 cm,12.2 cm,没有显著性差异($p>0.05$);盐浓度为 0.9%时,与 CK 相比显著下降了 16.1cm($p<0.05$)。

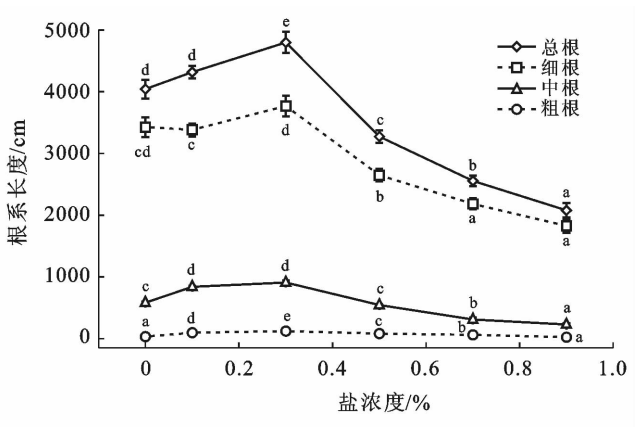
表 1 不同盐浓度处理对紫穗槐幼苗生长的影响

盐浓度/%	平均基径/mm	平均株高/cm
0	6.43±0.14^{b}	74.5±5.54^{bc}
0.1	6.48±0.15^{b}	80.0±6.04^{c}
0.3	6.90±0.05^{c}	82.1±4.45^{c}
0.5	5.74±0.13^{a}	65.9±4.80^{ab}
0.7	5.69±0.13^{a}	62.3±2.95^{ab}
0.9	5.59±0.13^{a}	58.4±2.78^{a}

注:表中数据为平均值±标准误差;不同小写字母代表处理间在 $p<0.05$ 水平上差异显著。下同。

2.2 盐胁迫对紫穗槐幼苗根系长度的影响

由图 1 可知,NaCl 盐胁迫下,紫穗槐幼苗根系总根长及各径级根系长度随盐浓度的增加呈先上升后下降的趋势,在 0.3%盐浓度下紫穗槐总根长增加显著($p<0.05$),比 CK 增加了 757.04 cm,在 0.5%～0.9%浓度下,根系总长度显著下降($p<0.05$),分别比 CK 下降了 19.04%,36.77%,48.57%。细根($d\leqslant 0.5$ mm)的根长,在 0.1%～0.3%盐浓度下与 CK 相比无显著差异($p>0.05$);0.5%～0.9%盐浓度对其有显著的抑制作用($p<0.05$);紫穗槐中根(0.5 mm$<d\leqslant$2.0 mm)的根长在 0.1%～0.3%盐浓度下显著增加($p<0.05$),分别增加了 44.24%,56.38%,0.5%盐浓度下对其抑制作用不明显,0.7%～0.9%的盐浓度,对其有显著的抑制作用($p<0.05$);粗根($d>2.0$ mm)的根长在 0.1%～0.7%盐浓度下与 CK 相比均有显著差异($p<0.05$),其中 0.3%盐浓度下与 CK 相比,增加了 89.6 cm。



注:不同小写字母代表处理间在 $p<0.05$ 水平上差异显著。下同。

图 1 盐胁迫对紫穗槐根系长度的影响

2.3 盐胁迫对紫穗槐幼苗根系表面积的影响

根系总表面积一定程度上体现了根系和土壤接触的总面积[17]。随着 NaCl 盐浓度的增加,紫穗槐幼苗总表面积及各径级表面积呈先上升后下降的趋势。在 0.1%～0.5%盐浓度下紫穗槐根系总表面积与 CK 相比显著增加($p<0.05$),分别增加了 35.33%,70.14%,17.11%;0.7%盐浓度下总根系表面积与 CK 相比没有显著性差异($p>0.05$),0.9%盐浓度下根系表面积与 CK 相比显著降低了 40.48%;0.1%～0.5%盐浓度下,主要通过促进紫穗槐中根的表面积增加了紫穗槐根系总表面积,0.7%盐浓度下,紫穗槐中根的表面积比 CK 显著增加了 39.35%($p<0.05$)(图 2)。

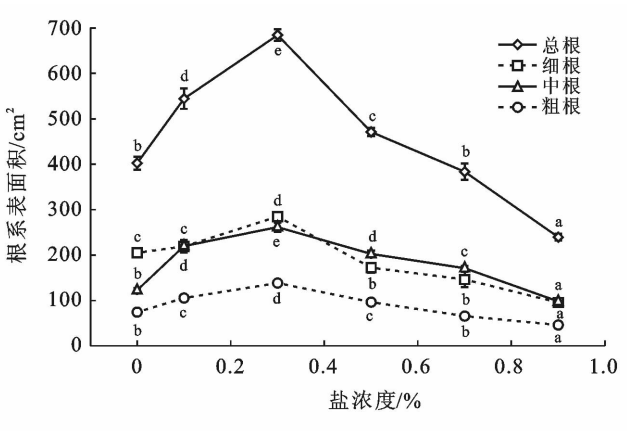


图 2 盐胁迫对紫穗槐根系表面积的影响

2.4 盐胁迫对紫穗槐幼苗根系体积的影响

紫穗槐根系总体积在 NaCl 盐胁迫下,随着 NaCl 盐浓度的增加呈先升高后降低的趋势;在 0.1%～0.3%盐浓度下,显著增加了紫穗槐根系总体积($p<0.05$),分别比 CK 增加了 2.11 和 4.06 cm^3,0.7%～0.9%盐浓度对紫穗槐根系总体积有显著的抑制作用($p<0.05$)。与根系总表面积一致,在 0.1%～0.3%盐浓度下,主要通过促进中根的体积增加了紫穗槐根系总体积。紫穗槐细根体积随着盐浓度的增加呈下降趋势,在 0.1%～0.3%盐浓度下与 CK 相比差异不显著($p>0.05$),0.5%～0.9%盐浓度下与 CK 相比显著降低了 0.47,0.48,0.86 cm^3。紫穗槐中根的体积在 0.1%～0.7%盐浓度下与 CK 相比分别显著增加了 3.73,3.30,1.56,2.26 cm^3($p<0.05$)。紫穗槐粗根在 0.3%,0.5%盐浓度下与 CK 相比差异不显著($p>0.05$),0.1%,0.7%,0.9%盐浓度下与 CK 相比显著降低了 1.40,3.67,4.72 cm^3($p<0.05$)(图 3)。

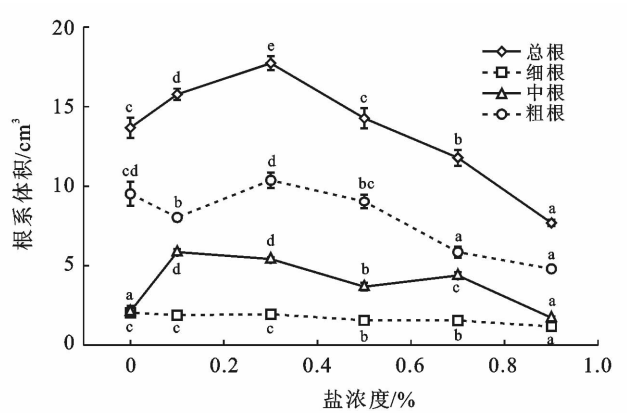


图 3 盐胁迫对紫穗槐根系体积的影响

2.5　盐胁迫对紫穗槐幼苗根系根尖数的影响

紫穗槐根系总根及各径级根尖数随 NaCl 盐浓度的增加呈先升高后降低的趋势，在 0.3%盐浓度下，总根尖数与 CK 相比显著增加了 16.64%（$p<0.05$）。紫穗槐细根的根尖数在 0.3%盐浓度下比 CK 显著增加了 16.36%（$p<0.05$）；中根的根尖数在 0.3%和 0.5%盐浓度下显著比 CK 增加了 100.20%，50.30%（$p<0.05$）；粗根的根尖数在各盐浓度下与 CK 相比无明显促进作用。说明导致紫穗槐根系总根尖数增加的原因是细根及中根的根尖数增加（表 2）。

表 2　盐胁迫对紫穗槐不同直径（d）根尖数的影响

盐浓度/%	根系总根尖数	$d\leqslant 0.5$ mm 根尖数	0.5 mm$<d\leqslant$2.0 mm 根尖数	$d>2.0$ mm 根尖数
0	10 183±386^{bc}	10 093±377^{bc}	85±11^{ab}	5±1^{bc}
0.1	11 241±462^{cd}	11 065±462^{cd}	170±6^{d}	7±1^{c}
0.3	11 878±832^{d}	11 744±836^{d}	128±8^{c}	6±1^{bc}
0.5	10 112±403^{bc}	10 013±406^{bc}	95±6^{b}	3±1^{a}
0.7	8 730±211^{ab}	8 635±209^{ab}	91±4^{b}	4±1^{ab}
0.9	7 400±432^{a}	7 329±431^{a}	68±2^{a}	3±1^{a}

3　讨论与结论

3.1　讨 论

土壤盐渍化会增大土壤溶液渗透压，降低土壤透水性、透气性，降低土壤养分含量，影响植物正常生长，甚至会造成植物萎蔫或死亡，最终使地表植被群落退化[5]；根系的不同分支等级具有不同的生长生理特征，细根的主要功能是为植物吸收生长发育所需要的营养，粗根的主要功能为运输养分及使植物稳定在土体中[18-20]；盐渍条件下，植物可通过降低根系表面积，增加直径等措施来缓解盐胁迫对植物的损害，但这种调节方式不利于根系获取营养和水分等生理功能的发挥[21]，可见，植物根系对盐胁迫的调节方式与其他功能的发挥存在着一定的矛盾，主要是因为根系是最早感受逆境胁迫信号的器官，它在逆境下的分布特征是植物降低逆境危害最直接的表现，植物根系系统存在着复杂的分支结构，而不同径级根系形态对养分积累、运移有不同的作用[11]。因此，植物如何通过调节根系形态结构，使植物既能提高抗盐胁迫的能力又能保证其发挥正常的生理功能有待进一步的研究[22]。

植物为了减缓盐胁迫对根系的损害，会将更多的资源分配到细根及中根以降低根系周围盐分的积累[23]；有研究表明，盐胁迫会抑制根系生长，导致根系各构型参数降低[24]，罗达[25]等研究发现盐胁迫下平欧杂种榛（*Corylus heterophylla* × *C. avellan*）随着盐胁迫的增强，其根系长度、表面积和体积等指标均下降；童辉[26]等研究发现，NaCl 和 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫均会抑制黄瓜（*Cucumis sativus*）根系的生长，降低其根系长度、表面积和体积；也有研究表明，盐胁迫会刺激根系生长发育，促进根系长度、表面积和体积等构型参数[27]；例如王树凤[22]等研究发现，弗吉尼亚栎（*Quercus virginiana*）根系形态指标随盐浓度的增强，呈先上升后下降的趋势；严青青[17]等研究发现低浓度盐胁迫有助于海岛棉（*Gossypium barbadense*）中、细根的长度、表面积、体积、根尖数的生长；盐分胁迫下，耐盐基因型棉花可通过增加中、细根的长度、表面积和根体积，促使比根长增加，提高根系的构建效率[23]。本研究表明随着 NaCl 盐浓度的增加，紫穗槐幼苗根系的根长、表面积、体积、根尖数呈现先升高后下降的趋势，在 0.1%～0.3%盐浓度处理下，紫穗槐细根、中根的长度、表面积、体积、根尖数有不同程度的增加，其株高没有显著增加，基径在盐浓度为 0.3%时显著增加；当盐浓度为 0.5%～0.7%时，紫穗槐中、细根各形态指标呈下降趋势，其基径显著低于 CK；当浓度为 0.9%时，紫穗槐幼苗细、中根的各形态参数与 CK 相比均显著下降，其株高和基径显著低于 CK。综合分析 4 项根系形态指标和 2 项生长指标可以发现，紫穗槐主要通过调节中、细根的形态结构影响紫穗槐地上部分的生长，并减缓盐胁迫的危害；闫永庆[16]等研究发现低于 0.5%的 NaCl 溶液对紫穗槐的生长影响不明显；当 NaCl 浓度达到 1.1%时，对植物造成的伤害非常明显；江远芳[28]等研究表明只有高浓度的单盐超过 30 d 的胁迫，才会严重影响紫穗槐的生长。本研究表明当盐浓度大于 0.5%时，紫穗槐根系各构型指标呈下降趋势，这可能是因为盐碱胁迫下，植物根系是最直接的受害部分[17]，因此紫穗槐根系的敏感程度可能要高于地上部分，由于根系是植物吸收水分和养分的主要器官，是植物和土壤的媒介，其生长状况直接影响植物地上部分的生长发育；因此轻度盐碱胁迫下紫穗槐通过增加细、中根的根长、表面积、体积和根尖数使其可在更大范围和更大面积吸收水分和养分供其生长抵抗盐胁迫[29]；当随着盐浓度的增加，盐胁迫的危害超出紫穗槐的承受能力，紫穗槐根系通过降低根系各构型参数，来影响植物地上部的生长发育，以降低盐胁迫的危害[30]。本研究结果与前人研究结果[31-33]趋势一致，但不完全相同；王树凤[22]等研究发现，麻栎（*Quercus acutissima*）和弗吉尼亚栎 2 种栎树根系对盐胁迫的响应策略不同，盐渍条件下麻栎因过多的盐离子进入根系导致根系的生长发育受到抑制，因而采取减少根系分布范围

的避性机制以最大限度地降低逆境对植物的毒害[34],而盐胁迫下弗吉尼亚栎能通过主动扩大根系分布范围来吸收利用更大空间的水分和养分资源。由此可见,植物根系在响应盐胁迫时会表现出截然不同的响应策略,这可能与不同试验的植物种类、植物年龄、盐分组成、胁迫强度等因素有关。

3.2 结 论

植物根系是植物幼苗期主要的营养物质吸收、传送的器官,其生长状况直接影响植物地上部分的生长发育。本研究表明,NaCl 盐浓度在 0.1%～0.3%时,对紫穗槐根系的生长有明显的促进效果或无显著抑制作用,可维持植物的正常生长。当盐浓度大于 0.5%时,不同径级根系的长度、表面积、体积及根尖数呈下降趋势,当盐浓度达到 0.9%时,生长明显受到抑制。所以,紫穗槐能够在盐浓度小于 0.9%的环境下生长。这一研究结果可为盐渍地区植被优化恢复提供一定的理论支持。

[参 考 文 献]

[1] Zhou De, Lin Zhulu, Liu Liming, et al. Regional land salinization assessment and simulation through cellular automaton-Markov modeling and spatial pattern analysis [J]. Science of the Total Environment, 2012,439(22):260-274.

[2] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等.盐碱地可持续利用研究综述[J].地理学报,2011,66(5):673-684.

[3] 孙保平.荒漠化防治工程学[M].北京:中国林业出版社,2000.

[4] 王印川.紫穗槐及其经济利用价值[J].山西水土保持科技,2003,30(1):21-23.

[5] 尹勤瑞.盐碱化对土壤物理及水动力学性质的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2011.

[6] Yu Ruihong, Liu Tingxi, Xu Youpeng, et al. Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao irrigation district of North China [J]. Agricultural Water Management, 2010,97(12):1952-1960.

[7] Gao Fan, Huang Qiang, Sun Xiaoyi, et al. Study on dynamic changes of the soil salinization in the upper stream of the Tarim River based on RS and GIS [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011,11(Part C):1135-1141.

[8] Zhang Tingting, Zeng Shenglan, Gao Yu, et al. Assessing impact of land uses on land salinization in the Yellow River Delta, China using an integrated and spatial statistical model [J]. Land Use Policy, 2011,28(4):857-866.

[9] Cramer G R, Läuchli A, Epstein E. Effects of NaCl and $CaCl_2$ on Ion activities in complex nutrient solutions and root growth of cotton [J]. Plant Physiology, 1986,81(3):792-797.

[10] Jilani G. Differential response of root morphology to potassium deficient stress among rice genotypes varying in potassium efficiency [J]. Journal of Zhejiang University-Science B, 2008,9(5):427-434.

[11] Schleiff U. Conceptual approach to lateral salinity gradients around roots of salt-sensitive and salt-tolerant crops under irrigation conditions [J]. Ecological Questions, 2011,14(1):35-38.

[12] Dupuy L, Thierry F, Alexia S. A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension [J]. European Journal of Soil Science, 2005,56(3):319-327.

[13] 姜慧敏,宝音陶格涛.黄花苜蓿根系生长特征研究[J].中国草地学报,2014,36(1):53-57.

[14] 李卫,杨军,郭光沁,等.紫穗槐的离体快速繁殖[J].西北植物学报,2002,22(2):62-69.

[15] 吴志远.地埂柠条和紫穗槐的水保作用与生态及经济效益分析[J].水土保持研究,1999,6(S1):36-37,57.

[16] 闫永庆,朱虹,刘兴亮,等.盐胁迫对紫穗槐生长发育及生理特性的影响[J].东北农业大学学报,2008,39(12):31-35.

[17] 严青青,张巨松,徐海江,等.盐碱胁迫对海岛棉幼苗生物量分配和根系形态的影响[J].生态学报,2019,39(20):1-9.

[18] Pregitzer K S, Deforest J L, Burton A J, et al. Fine root architecture of nine North American trees [J]. Ecological Monographs, 2002,72(2):293-309.

[19] Guo Dali, Xia Mengxue, Wei Xing, et al. Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species [J]. The New phytologist, 2008,180(3):673-683.

[20] McCormack M L, Dickie I A, Eissenstat D M, et al. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes [J]. New Phytologist, 2015,207(3):505-518.

[21] Colmer T D. Long-distance transport of gases in plants: A perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots [J]. Plant Cell, 2010,26(1):17-36.

[22] 王树凤,胡韵雪,孙海菁,等.盐胁迫对 2 种栎树苗期生长和根系生长发育的影响[J].生态学报,2014,34(4):1021-1029.

[23] 王庆惠,韩伟,侯银莹,等.不同耐盐品种棉花根系主要指标对盐分胁迫的响应[J].应用生态学报,2018,29(3):865-873.

[24] Srinivasarao C, Benzioni A, Eshel A, et al. Effects of salinity on root morphology and nutrient acquisition by faba beans(*Vicia faba* L.) [J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 2004,52(2):184-191.

(下转第 68 页)

[21] Renard K G, Freimund J R, et al. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE [J]. Journal of Hydrology, 1994, 157(1/4): 287-306.

[22] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等. 基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J]. 农业工程学报,2011,27(2): 337-344.

[23] Williams J R. EPIC: The erosion-productivity impact calculator [J]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990,4(4):206-207.

[24] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(5):1759-1763.

[25] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of the Asae, 1989,30(5):1387-1396.

[26] 田鹏,赵广举,穆兴民,等. 基于改进 RUSLE 模型的皇甫川流域土壤侵蚀产沙模拟研究[J]. 资源科学,2015, 37(4):832-840.

[27] 马良,姜广辉,左长清,等. 江西省 50 余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征[J]. 农业工程学报,2009,25 (10):61-68.

[28] 朱成刚,李卫红,李大龙,等. 伊犁河谷土壤理化性质及可蚀性特征分析[J]. 资源科学,2016,38(7):1212-1221.

[29] 李新艳,杨勤科,王春梅. 赣南地区侵蚀地形因子研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42 (1):175-182.

[30] 谢颂华,曾建玲,杨洁,等. 江西水土流失省情分析[J]. 南昌工程学院学报,2010,29(3):69-72.

[31] 张平仓,程冬兵. SL657-2014 南方红壤丘陵区水土流失综合治理技术标准[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2019.

[32] Mehri A, Salmanmahiny A, Tabrizi A R M, et al. Investigation of likely effects of land use planning on reduction of soil erosion rate in river basins: Case study of the Gharesoo River basin [J]. Catena, 2018,167: 116-129.

[33] Kosmas C, Danalatos N, Cammeraat L H, et al. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions [J]. Catena, 1997,29(1): 45-59.

[34] 柳冬青,张金茜,李红瑛,等. 基于地理探测器的流域土壤磷流失影响因素分析[J]. 环境科学学报,2018,38 (12):4814-4822.

(上接第 58 页)

[25] 罗达,史彦江,宋锋惠,等. 盐胁迫对平欧杂种榛幼苗生长、光合荧光特性及根系构型的影响[J]. 应用生态学报,2019,30(10):3376-3384.

[26] 童辉,孙锦,郭世荣,等. 等渗 $Ca(NO_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗根系形态及活力的影响[J]. 南京农业大学学报,2012,35(3):37-41.

[27] He Xinjian, Mu Ruiling, Cao Wanhong, et al. AtNAC2, a transcription factor downstream of ethylene and auxin signaling pathways, is involved in salt stress response and lateral root development [J]. Plant Journal, 2005,44(6):903-916.

[28] 江远芳,王竞红,薛菲. 3 种碱性盐胁迫对紫穗槐形态和生理的影响[J]. 东北林业大学学报,2014,42(8):30-33,64.

[29] 陈晓娜,高永,赵纳祺,等. 羊柴根系对毛乌素盐碱状况的适应性评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(8):89-94.

[30] Zhang Qixiang, Chen Wenbin, Sun Lidan, et al. The genome of *Prunus mume* [J]. Nature Communications, 2012,3(4):1318.

[31] Bolu W H, Polle A. Growth and stress reactions in roots and shoots of a salt-sensitive poplar species [J]. Tropical Ecology, 2004,45(1):161-171.

[32] Egamberdieva D, Wirth S, Jabborova D, et al. Coordination between *Bradyrhizobium* and *Pseudomonas* alleviates salt stress in soybean through altering root system architecture [J]. Journal of Plant Interactions, 2017,12(1):100-107.

[33] 宋香静,李胜男,郭嘉,等. 不同盐分水平对柽柳扦插苗根系生长及生理特性的影响[J]. 生态学报,2018,38 (2):606-614.

[34] Day S D, Wiseman P E, Dickinson S B, et al. Tree root ecology in the urban environment and implications for a sustainable rhizosphere [J]. Arboriculture and Urban Forestry, 2010,36(5):193-205.