

水分胁迫和氮添加对白刺根系形态的调控效应

陈晓娜¹, 郝玉光¹, 段娜^{1,2}, 赵纳祺¹, 高君亮¹, 张鸿恽¹, 李清河^{3,4*}

(1. 国家林业和草原局内蒙古磴口荒漠生态系统定位观测研究站/中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 磴口 015200;

2. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010010; 3. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091;

4. 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 为筛选出干旱地区唐古特白刺 (*Nitraria tangutorum*) 根系生长的最佳氮添加量。以唐古特白刺为试材, 在干旱胁迫和水分充足两个水分条件下, 分别设置 4 个氮添加水平 (0、6、36、60 mmol·L⁻¹), 研究不同土壤水分和氮处理对唐古特白刺根系形态发育特征的影响。水分充足时, 氮浓度越高, 对白刺根系的抑制效果越明显。当氮浓度为 60 mmol·L⁻¹ 时, 白刺总根长、表面积、体积、直径和根尖数仅为未施氮处理的 55.45%、47.07%、38.63%、79.37% 和 76.55%。水分胁迫下, 白刺总根长、表面积、根尖数均在氮浓度为 36 mmol·L⁻¹ 时达到最高值, 分别为 792.13 cm、155.74 cm²、2 370.00 个, 较无氮处理增加了 31.96%、42.95% 和 20.84%。水分充足时, 氮添加会抑制白刺根系生长发育; 水分胁迫下, 氮添加会促进白刺根系生长, 但并非氮素浓度越高, 促进效果越好。水分充足时的白刺根系生长状况始终优于干旱条件下的白刺。

关键词: 氮添加; 水分胁迫; 根系形态; 唐古特白刺

中图分类号: S793.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)05-0810-05

The effects of water stress and nitrogen addition on root morphology of *Nitraria tangutorum*

CHEN Xiaona¹, HAO Yuguang¹, DUAN Na^{1,2}, ZHAO Naqi¹, GAO Junliang¹, ZHANG Hongyi¹, LI Qinghe^{3,4}

(1. Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem Research Station, State Forestry and Grassland Administration / Desert Forestry Experiment Center, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200; 2. Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010; 3. Research Institute of Forestry Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091; 4. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091)

Abstract: In order to study the effects of water stress and nitrogen addition on root morphology of *Nitraria tangutorum*, the root morphological indexes of *Nitraria tangutorum* were studied under drought stress and nitrogen addition (0 mmol·L⁻¹, 6 mmol·L⁻¹, 36 mmol·L⁻¹, 60 mmol·L⁻¹). When water was sufficient, nitrogen addition could inhibit root growth, and the higher the nitrogen concentration, the more obvious the inhibition effect. When the nitrogen concentration was 60 mmol·L⁻¹, the total root length, surface area, volume, diameter and number of root tips were 55.45%, 47.07%, 38.63%, 79.37% and 76.55% respectively of without nitrogen treatment. Under water stress, the total root length, surface area and number of root tips were the highest when nitrogen concentration was 36 mmol·L⁻¹, they were 792.13 cm, 155.74 cm² and 2 370.00 respectively, which increased by 31.96%, 42.95% and 20.84% compared with nitrogen free treatment. When water was sufficient, nitrogen addition could inhibit root growth. Under water stress, nitrogen addition could promote root growth, but not the higher the nitrogen concentration, the better the promotion effect. Compared with the same nitrogen concentration under different water conditions, the root growth of *Nitraria tangutorum* was stronger than that of drought stress.

Key words: Nitrogen addition; drought stress; root morphology; *Nitraria tangutorum*

随着化石燃料燃烧、生产和使用农业氮肥、滥砍滥伐和畜牧业发展等人为活动的干扰, 使排放到

收稿日期: 2019-02-28

基金项目: 国家自然科学基金 (31470622) 和国家林木 (含竹藤花卉) 种质资源平台建设与运行服务 (2005DKA21003) 共同资助。

作者简介: 陈晓娜, 助理工程师。E-mail: 775164470@qq.com

* 通信作者: 李清河, 博士, 研究员。E-mail: tsinghel@163.com

大气中的活性氮化合物 (NO_y 和 NH_x) 数量和速率大幅度提高^[1]。氮沉降对植被生长等造成了较大的影响^[2-3], 氮沉降及其生态效应已成为生态学领域研究的一大热点^[4]。而我国土壤矿质养分中钾较丰富, 磷微缺, 氮较贫乏^[5]。内蒙古自治区磴口县地处我国乌兰布和沙漠东北缘, 该地区气候干旱, 降水稀少, 水资源短缺是阻碍该地区植物正常生长的重要因素之一, 当植被受到干旱胁迫时会产生很多抗逆性反应。特殊的气候原因使干旱半干旱区的氮输入形式常常是伴随降水等形式形成短时期充足的营养供给, 然后一部分为植物吸收、微生物固定提供能源, 另一部分则随土壤下渗。施肥虽可以达到“以肥调水”的效果, 但氮含量过高会造成氮资源浪费及污染环境^[6-7], 另一方面对植物的营养状况产生副作用^[8]。不同干旱程度下, 氮素对植物生长发育的影响有所差别, 土壤水分或氮素不足对植物生长的影响是由多方面体现的。因此, 研究干旱地区氮沉降对植被生长状况的影响, 为当地合理利用氮提供具体详细的理论依据十分必要。

根系是植物吸收水分和营养的重要器官, 也是合成氨基酸和多种植物激素主要场所, 培育健壮良好的根系是实现作物增加产量潜力的重要方法^[9-10]。根系形态具有趋水性和趋肥性, 土壤水分与养分对植物根系生长又具有“可塑性”^[11], 当植被遭遇胁迫危害时, 根系会立刻感受到逆境胁迫信号, 并通过调整根系形态或分布以适应外部环境^[12-14]。因此, 研究土壤水分和养分对植物根系形态变化的影响, 对实现水肥的高效利用具有不可忽略的作用^[15]。唐古特白刺 (*Nitraria tangutorum*) 为蒺藜科 (*Zygophyllaceae*) 白刺属, 多年超旱生灌木, 是干旱荒漠和半荒漠地区重要的建群种之一。唐古特白刺枝条呈开展或平卧状, 沙埋后其节点处会萌生新枝, 外界环境压力影响下, 生殖方式多为压条型克隆繁殖^[16-17]。目前有关唐古特白刺的研究主要为无性繁殖^[18-19]、种子发芽、幼苗生长^[20-21]及应对胁迫的生理反映等^[22-24], 有关在气候变化背景下, 沙漠生境中的氮素营养对其生长影响的研究较少。因此, 本研究以唐古特白刺为研究对象, 研究不同水分条件下氮素对其根系形态的影响, 筛选出在干旱条件下适合唐古特白刺根系生长的最佳氮添加量, 以期沙漠地区唐古特白刺的繁殖生长提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 仪器与试剂

试验苗木为唐古特白刺幼苗; 所施氮肥为含氮

量 46.7% 的尿素; 栽植容器为直径 16 cm、高 40 cm 的 PVC 花盆; 基质为当地腐殖质多、盐碱低的农田表土 (过 0.5 cm 筛子) 与细沙 1:1 的混合土壤。

1.2 试验设计

2015 年 3 月于中国林业科学研究院沙漠林业实验中心院内进行试验。3 月中旬在营养钵育苗, 5 月初选择大小相对一致的幼苗移入 PVC 花盆中, 每盆 1 株, 桶底周围排列着均匀的小孔以保证盆内植物根系具有良好的通气条件, 花盆底部采用可卸装置, 避免取根时对根系造成破坏。试验开始时搭建遮雨棚, 苗期对其进行正常管护工作, 待白刺幼苗有大量叶片展开时 (6 月初) 开始施用氮肥。根据该地区不同生境的实际土壤氮含量, 本试验氮含量共设置 4 个梯度 0、6、36、60 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 将称好的氮肥溶于 1 L 蒸馏水中, 均匀地喷洒到各花盆中。施肥结束后控制浇水量, 水分设置正常浇水、干旱胁迫 2 个梯度, 其中, 正常浇水处理每天采用称重法补充土壤所缺水分, 保证土壤含水量控制为田间持水量 (20.29%) 的 100%; 干旱胁迫处理为田间最大持水量的 20%~40%。正常浇水条件下不同施氮水平处理分别记作 CK-0、CK-6、CK-36、CK-60, 干旱条件下不同施氮水平处理分别记作 T-0、T-6、T-36、T-60, 每个处理 25 个重复。

1.3 测定指标

植物生长结束期将 3 个重复的唐古特白刺根系取出, 根系洗干净后采用 EPSON 扫描仪获取根系的形态图像, 利用 Win Rhizo Pro 2007 根系分析系统软件进行根系体积等指标的测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 统计软件对试验数据进行整理, 采用 Origin 8.0 进行画图, 利用 SPSS 17.0 对数据进行显著性差异分析 (Duncan 法)。

2 结果与分析

2.1 氮添加对白刺总根长的影响

本研究将根系径级 $d < 1$ mm 划分为细根, $d < 3$ mm 划分为小根, $3 \text{ mm} < d < 10 \text{ mm}$ 划分为中根^[25]。由表 1 可知, 在保证水分充足情况下, 氮添加会显著抑制白刺总根长的生长 ($P < 0.05$), 且浓度越高, 抑制效果越明显。正常浇水不施氮肥条件下, 白刺总根长为 1 346.36 cm, 氮添加浓度为 60 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 总根长仅为 746.59 cm。水分充足时, 氮添加对细根的作用较小根和中根明显。干旱处理时, 氮添加会促进白刺总根长以及各级根长生长, 浓度为 36 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氮肥对白刺根长的促进效果最好, 此时

总根长为 792.13 cm, 较 T-0 处理增加了 191.83 cm, 当氮添加浓度为 60 mmol·L⁻¹ 时, 白刺根长仅较 T-0 处理增加了 30.00 cm。对比相同氮添加浓度, 不同

水分条件下白刺根长可以发现, 水分充足时白刺根长生长明显优于干旱条件下根长, 随氮添加浓度的升高, 差异逐渐减小, 无氮添加下二者差异最明显。

表 1 氮添加对白刺总根长的影响

Table 1 The effect of nitrogen addition on total root length of *Nitraria tangutorum*

处理 Treatment	总根长/cm·盆 ⁻¹ Length	根系径级 Root diameter class/mm		
		d≤1	1<d≤3	d>3
CK-0	1 346.36±77.66 ^a	1 159.29±47.92 ^a	139.36±4.14 ^a	47.32±2.47 ^b
CK-6	1 175.43±61.20 ^b	986.44±51.23 ^b	136.44±4.60 ^a	52.76±2.72 ^a
CK-36	944.35±48.27 ^c	746.84±32.93 ^c	142.81±4.21 ^a	54.51±2.09 ^a
CK-60	746.59±36.09 ^d	607.08±30.02 ^d	113.07±4.99 ^b	26.52±2.52 ^c
T-0	600.30±26.06 ^c	523.67±30.92 ^c	68.15±2.57 ^d	8.52±0.46 ^d
T-6	710.53±61.40 ^{ab}	604.90±27.52 ^b	88.18±2.14 ^b	17.62±0.33 ^b
T-36	792.13±65.14 ^a	683.25±38.95 ^a	93.09±2.68 ^a	15.74±0.81 ^c
T-60	630.30±51.42 ^{bc}	528.66±28.89 ^c	79.07±2.90 ^c	22.39±0.88 ^a

注: 不同字母代表相同水分不同氮添加浓度下的指标差异显著。下同。

Note: Different letters indicate significant difference under the same water and different nitrogen concentration. The same below.

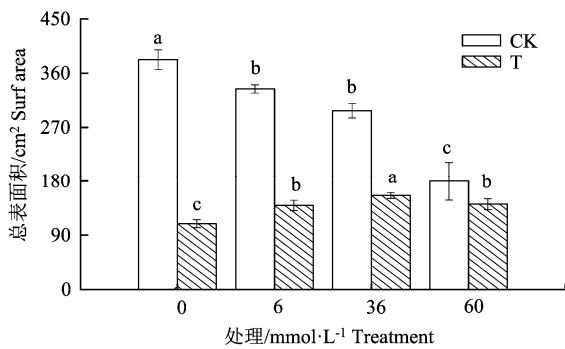


图 1 氮添加对白刺根系总表面积的影响

Figure 1 The effect of nitrogen addition on root surface area of *Nitraria tangutorum*

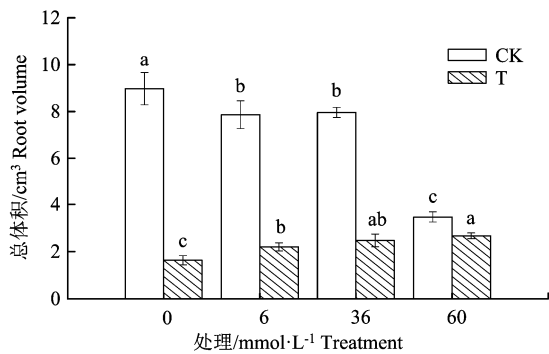


图 2 氮添加对白刺根系总体积的影响

Figure 2 The effect of nitrogen addition on total root volume of *Nitraria tangutorum*

2.2 氮添加对白刺根系总表面积的影响

由图 1 可知, 在土壤水分充足时, 氮添加会降低白刺根系总表面积。随氮添加浓度的增加, 白根系表面积呈逐渐降低的趋势, 6 和 36 mmol·L⁻¹ 的氮添加对白刺根系表面积的影响不显著 ($P>0.05$), 60 mmol·L⁻¹ 的氮添加对白刺根系表面积的抑制作用较

显著 ($P<0.05$), 此时根系表面积为 180.03 cm², 是 CK-0 的 47.07%。在干旱条件下, 氮添加会促进白刺根系表面积的生长。随氮添加浓度的增加, 白刺根系表面积的增加幅度呈先增加后降低的趋势, 当氮添加浓度为 36 mmol·L⁻¹, 白刺根系表面积达到最大值, 为 155.74 cm²。在氮添加浓度相同时, 白刺根系表面积在水分充足时较干旱条件下生长的快, 随氮添加浓度的增加, 二者的差异逐渐减小, 在无氮添加时, 二者的差异最大。此时, CK-0 为 382.46 cm², T-0 为 108.94 cm², CK-0 是 T-0 的 3.51 倍。

2.3 氮添加对白刺根系总体积的影响

图 2 是氮添加对白刺根系总体积的影响。分析图 2 可知, 在土壤水分充足时, 氮添加会抑制白刺根系体积的生长。随氮添加浓度的增加, 白根系体积呈逐渐降低的趋势, 6 mmol·L⁻¹ 和 36 mmol·L⁻¹ 的氮添加对白刺根系体积的抑制作用不显著 ($P>0.05$), 60 mmol·L⁻¹ 的氮添加对白刺根系体积的抑制作用较显著 ($P<0.05$), 此时根系体积为 3.47 cm³, 是 CK-0 的 38.63%。在干旱条件下, 氮添加会显著促进白刺根系体积的生长 ($P<0.05$)。随氮添加浓度的增加, 白刺根系体积呈逐渐增加的趋势, 当氮添加浓度为 60 mmol·L⁻¹, 白刺根系体积达到最大值, 为 2.67 cm³。在氮添加浓度相同时, 白刺根系体积在水分充足时较干旱条件下生长的快, 随氮添加浓度的增加, 二者的差异逐渐减小, 在无氮添加时, 二者的差异最大。此时, CK-0 为 8.98 cm³, T-0 为 1.64 cm³, CK-0 是 T-0 的 5.48 倍。

2.4 氮添加对白刺根系平均直径的影响

分析图 3 可知, 在土壤水分充足时, 6 mmol·L⁻¹

和 $36 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氮添加对白刺根系平均直径的影响不显著 ($P>0.05$), $60 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氮添加对白刺根系直径的抑制作用较显著 ($P<0.05$)。在干旱条件下, 氮添加会促进白刺根系平均直径的增加, 随氮添加浓度的增加白刺根系平均直径越大, 但效果均不显著 ($P>0.05$)。相同氮添加浓度下, 土壤水分充足时的白刺根系平均直径较干旱条件下生长迅速。

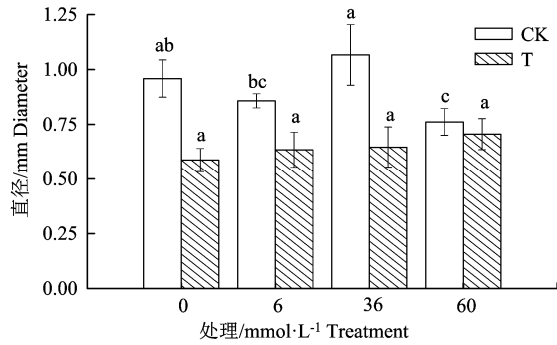


图 3 氮添加对白刺根系平均直径的影响

Figure 3 The effect of nitrogen addition on average diameter of *Nitraria tangutorum*

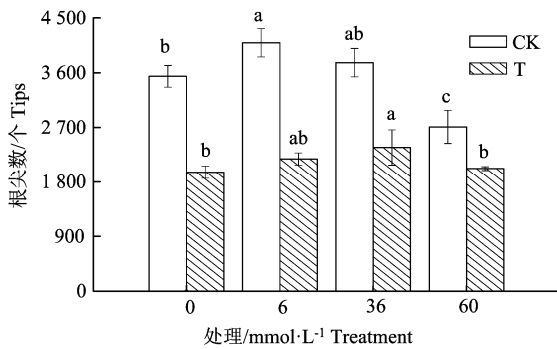


图 4 氮添加对白刺根尖数的影响

Figure 4 The effect of nitrogen addition on root tip number of *Nitraria tangutorum*

2.5 氮添加对白刺根尖数的影响

由图 4 可知, 在土壤水分充足时, 白刺根尖数随氮添加浓度的增加呈先升高后降低的趋势, 当氮添加浓度为 $6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $36 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 白刺根尖数会高于 CK-0, 当氮添加浓度为 $60 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 白刺根尖数显著低于 CK-0 ($P<0.05$)。干旱条件下, 氮添加会促进白刺根尖数的增多, $36 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氮添加对白刺根尖数的促进效果最好, $6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $60 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氮添加对白刺根尖数的促进效果均不显著 ($P>0.05$)。

3 讨论与结论

植物根系形态具有可塑性, 其生长发育受遗传和外界环境二者的共同影响。在影响植物生长的众多因素中, 土壤水分和养分的胁迫对植物的作用效

果是居首位的^[26], 而在矿质养分中氮素对根系的影响最为突出^[27]。一定范围内的灌水量和施肥量与根系生长呈正比例关系, 水氮不足或过量都将影响植物根系大小、数量以及分布。许建定^[26], 谢志良等^[27-28]研究发现, 在正常灌水条件下, 氮添加能够降低棉花平均根长密度和根表面积。且随氮浓度的增加, 棉花平均根长密度和根表面积下降的幅度逐渐增加。李秧秧等^[11]研究发现, 水分充足时氮添加会促进玉米 (*Zea mays*) 总根系和表层根系伸长生长, 而王艳等^[29]研究发现正常水分条件下氮添加会抑制玉米根系生长, 玉米根系生物量、根长及根系表面积都会降低。本试验结果表明, 在水分充足时, 氮添加会阻碍白刺根长、表面积以及根系体积等指标的生长, 且浓度越高, 抑制程度越大, 氮添加对白刺细根根长的抑制效果较小根和中根更为严重, 而细根又是植物吸收水分和养分的主要部分, 因此氮添加作用后白刺吸收水分和养分的能力也会降低。分析原因可能是, 当土壤水分适宜且养分满足植物正常需求情况时, 植物根系能够连续不断地吸收土壤水分与养分, 少量根系即可吸收到满足整个植株生长的水分和养分, 且本试验为盆栽试验, 由于花盆盆体大小的限制, 过大的白刺根系在 PVC 花盆中难以吸收足够的其他营养元素供根系生长, 因而过高的氮含量下白刺根系有所减少。

当植被的吸水速率低于蒸腾速率形成水分胁迫或土壤养分亏缺, 或二者兼具时, 植被根系和幼苗的生长就会遭受严重限制^[27]。干旱条件下适当施肥, 能够扩大植被根系伸展范围, 增强根系活力, 形成“以肥调水, 以水促肥”的效果^[30-31]。李秧秧等^[11]研究发现干旱条件下合理施氮的确能够促进植物根系生长。水分胁迫下中度氮肥下茄子 (*Solanum melongena*) 根系生长指标明显增加, 其产量也有所提高^[32]。在水分胁迫下, 根系表面积指数和平均根长密度增加说明水分胁迫能够延迟根系衰老。在正常水分条件下, 氮含量过高会导致根系提前衰老^[27]。水分胁迫下氮素对植物根系的作用效果不完全一致, 梁银丽等^[33]试验发现水分胁迫下少量的氮素对小麦 (*Triticum aestivum*) 幼苗的根系呈现促进作用, 氮素过量则表现出负效应, 对小南瓜 (*Cucurbita moschata*) 的研究也得出相似的结论^[34]。本研究表明, 在水分不足时, 氮添加则会促进白刺根长、表面积、根尖数、体积等生长。基本表现为 $36 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氮添加浓度作用效果最好, $60 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氮添加对白刺根系的促进作用会减弱。说明干旱条件下氮添加会增大白刺根系与土壤的相互结合面积, 促进白刺

根系在空间上发育状况,其生根的能力也会大幅度提高,进而提高白刺根系大范围地吸收水分与养分,增强白刺抗旱性。但氮含量不宜过多,当氮含量超过白刺所需氮素阈值时,不但不能被白刺充分利用,还可能会阻碍白刺正常生长。此外,相同氮浓度下,白刺根系生长状况始终表现为:水分充足>水分不足,且干旱条件下无论施氮量多少,白刺根系长势始终弱于水分充足时的白刺,说明在水分和氮素共同作用后,水分始终占据主要影响地位。

水分充足时,氮添加会抑制白刺根系生长,且随氮添加浓度的增加抑制作用逐渐增加,白刺总根长、根系表面积和根系体积所受的抑制作用均较显著 ($P<0.05$)。6 mmol·L⁻¹和36 mmol·L⁻¹浓度的氮添加对白刺直径的影响不显著 ($P>0.05$),60 mmol·L⁻¹的氮添加则会显著降低白刺直径。白刺根尖数随氮添加浓度的增加呈先增加后降低的趋势,当氮添加60 mmol·L⁻¹时,根尖数已显著低于无氮处理 ($P<0.05$)。水分不足时,氮添加会促进白刺根系的生长,基本表现为36 mmol·L⁻¹的氮浓度对白刺根系生长的促进作用效果最好,此时,白刺总根长、总表面积、根尖数均达到最大值,说明氮添加能够缓解干旱胁迫对白刺根系带来的危害,提高白刺抗旱性。相同氮浓度下,水分充足时的白刺根系生长状况始终优于干旱条件下的白刺,其总根长、表面积、体积、直径和根尖数均高于干旱条件下的白刺。

参考文献:

- PEÑUELAS J, POULTER B, SARDANS J, et al. Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe[J]. Nat Commun, 2013, 4(1): 2934.
- LU C Q, TIAN H Q, LIU M L, et al. Effect of nitrogen deposition on China's terrestrial carbon uptake in the context of multifactor environmental changes[J]. Ecol Appl, 2012, 22(1): 53-75.
- LIU X J, DUAN L, MO J M, et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview[J]. Environ Pollut, 2011, 159(10): 2251-2264.
- 徐翀, 庾强, 左小安, 等. 氮素添加对草原不同冠层植物光合作用的影响[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 135-141.
- 鲁如坤. 我国土壤氮、磷、钾的基本状况[J]. 土壤学报, 1989, 26(3): 280-286.
- JU X T, KOU C L, ZHANG F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China plain[J]. Environ Pollut, 2006, 143(1): 117-125.
- THORBURN P J, BIGGS J S, WEIER K L, et al. Nitrate in groundwaters of intensive agricultural areas in coastal north-eastern Australia[J]. Agric Ecosyst Environ, 2003, 94(1): 49-58.
- STAGNARI F, DI BITETTO V, PISANTE M. Effects of N fertilizers and rates on yield, safety and nutrients in processing spinach genotypes[J]. Sci Hort, 2007, 114(4): 225-233.
- 董桂春, 王余龙, 吴华, 等. 水稻主要根系性状对施氮时期反应的品种间差异[J]. 作物学报, 2003, 29(6): 871-877.
- 张成良, 姜伟, 肖叶青, 等. 水稻根系研究现状与展望[J]. 江西农业学报, 2006, 18(5): 23-27.
- 李秧秧, 刘文兆. 土壤水分与氮肥对玉米根系生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 13-15.
- 姚彩艳, 汪晓丽, 盛海君, 等. NaCl和PEG胁迫对玉米幼苗根系生长的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2007, 28(4): 42-46.
- 张晓磊, 刘晓静, 齐敏兴, 等. 混合盐碱对紫花苜蓿苗期根系特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 340-346.
- 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.
- 崔红艳, 胡发龙, 方子森, 等. 不同施氮水平对胡麻根系形态和氮素利用的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(5): 694-701.
- 张俊菲, 李清河, 王林龙, 等. 白刺幼苗芽库及根系构型对不同氮添加水平的响应[J]. 林业科学研究, 2018, 31(3): 158-166.
- 张运春, 苏智先, 高贤明. 克隆植物的特性及研究进展[J]. 四川师范学院学报(自然科学版), 2001, 22(4): 338-343.
- 李清河, 辛智鸣, 高婷婷, 等. 荒漠植物白刺属4个物种的生殖分配比较[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5054-5061.
- LI Q H, XU J, WANG S X, et al. Effects of aspect on clonal reproduction and biomass allocation of layering modules of *Nitraria tangutorum* in Nebkha Dunes[J]. PLoS One, 2013, 8(10): e79927.
- 李秋艳, 赵文智. 五种荒漠植物幼苗出土及生长对沙埋深度的响应[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1802-1808.
- 王桔红, 张勇. 贮藏条件和温度对4种蒺藜科植物种子萌发的影响[J]. 草业科学, 2009, 26(6): 110-115.
- 闫永庆, 刘兴亮, 王崑, 等. 白刺对不同浓度混合盐碱胁迫的生理响应[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1213-1219.
- 李清河, 王赛宵, 徐军, 等. 乌兰布和沙漠地区不同沙生灌木的耐盐性综合评价[J]. 草业科学, 2012, 29(7): 1132-1136.
- 薛海霞, 李清河, 徐军, 等. 沙埋对唐古特白刺幼苗生长和生物量分配的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(10): 2062-2070.
- WANG G L, FAHEY T J, XUE S, et al. Root morphology and architecture respond to N addition in *Pinus tabulaeformis*, West China[J]. Oecologia, 2013, 171(2): 583-590.
- 许建定. 土壤水分和氮磷营养对植物根系生长的影响[J]. 山西水土保持科技, 2010(3): 12-15.
- 谢志良, 田长彦. 膜下滴灌水氮对棉花根系形态和生物量分配变化的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 138-143.
- 谢志良, 田长彦, 卞卫国. 膜下滴灌水氮对棉花根系构型的影响[J]. 棉花学报, 2009, 21(6): 508-514.
- 王艳, 米国华, 张福锁. 氮对不同基因型玉米根系形态变化的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 69-71.
- 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 水氮互作对花生根系生长及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(5): 872-881.
- 信乃谏, 侯向阳, 张燕卿. 我国北方旱地农业研究开发进展及对策[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(4): 58-60.
- 杨振宇, 张富仓, 邹志荣. 不同生育期水分亏缺和施氮量对茄子根系生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(7): 141-148.
- 梁银丽, 陈培元. 水分胁迫和氮素营养对小麦根苗生长及水分利用效率的效应[J]. 西北植物学报, 1995, 15(1): 21-25.
- 刘世全, 曹红霞, 张建青, 等. 不同水氮供应对小南瓜根系生长、产量和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1362-1371.