

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.020

保水剂施用方式对侧柏根际微生态环境的影响

井大炜¹ 邢尚军² 刘方春² 马海林² 杜振宇² 马丙尧²

(1. 德州学院生态与园林建筑学院, 德州 253023; 2. 山东省林业科学研究院, 济南 250014)

摘要: 为探讨保水剂施用方式对侧柏根际微生态环境的作用效果,以侧柏裸根苗为试材,通过盆栽试验研究了不施肥和保水剂(CK)、单施尿素(U)、单施保水剂(S)、保水剂-尿素混施(SUM)和保水剂-尿素凝胶(SUG)等处理对侧柏根际土壤酶活性、微生物多样性及生长的影响。结果表明:同U处理相比,SUG处理明显增加了根系分泌物中氨基酸总量、有机酸总量和总糖含量;SUG处理显著提高了根际土壤过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶和蔗糖酶活性,其中脲酶活性分别较CK、U、S、SUM处理提高29.53%、14.88%、27.81%、7.82%;同时SUG处理亦提高根际土壤微生物平均吸光度(AWCD)、丰富度指数和均匀度指数,并降低了优势度指数,其中丰富度指数分别比CK、U、S、SUM处理提高28.78%、30.22%、26.91%、8.39%。此外,SUG处理还显著促进了侧柏地径和株高的生长,并明显高于其他处理。与SUG处理相比,S、SUM处理对侧柏根际土壤酶活性和微生物多样性的影响作用较小,说明保水剂-尿素凝胶方式较单施保水剂和保水剂-尿素混施方式可显著增强侧柏的干旱适应能力。由此可知,保水剂-尿素凝胶方式有利于改善侧柏根际土壤微生态环境,增强抵御干旱胁迫的能力,并促进生长。

关键词: 保水剂; 凝胶; 侧柏; 根际; 土壤酶活性; 微生物多样性

中图分类号: S728.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0146-09

Effect of Application Methods of Super Absorbent Polymers on Micro-ecological Environment in Rhizosphere Soil of *Platycladus orientalis*

Jing Dawei¹ Xing Shangjun² Liu Fangchun² Ma Hailin² Du Zhenyu² Ma Bingyao²

(1. College of Ecology and Garden Architecture, Dezhou University, Dezhou 253023, China

2. Shandong Academy of Forestry, Ji'nan 250014, China)

Abstract: Super absorbent polymers (SAP) can absorb water up to a few hundred or even a few thousand times of their own mass. Their special physical structures, unique chemical compositions, and characteristics of high water absorption capacity allow super absorbent polymers to be widely used in agriculture, forestry and other industries to relieve drought and reserve water for farmland, afforestation and crop yield improvement. However, the ways of super absorbent polymers applied is an important factor to evaluate. In order to explore the effect of SAP application ways on micro-ecological environment in rhizosphere soil of *Platycladus orientalis*, a pot experiment including five treatments, i. e. CK (neither fertilizer nor SAP was applied), U (urea was applied alone), S (SAP was applied alone), SUM (SAP was mixed with urea) and SUG (gel was made of SAP and urea) was performed. The experiment was to evaluate the effect of different ways of SAP application on enzyme activity and microbial functional diversity in rhizosphere soil as well as growth of *Platycladus orientalis*. Results indicated that in comparison to U treatment, the SUG treatment significantly increased total amino acids, total organic acids and total sugar in the root exudates. The activity of catalase enzyme, urease enzyme, polyphonic oxidase enzyme and invertase enzyme was also improved by SUG treatment, showing the urease enzyme

收稿日期: 2015-12-23 修回日期: 2016-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31500513)、山东省科技发展计划项目(2010GSF10621)和德州学院科技人才引进项目(311890)

作者简介: 井大炜(1982—),男,讲师,博士,主要从事植物营养机理与调控研究,E-mail: jingdawei009@163.com

通信作者: 邢尚军(1956—),男,研究员,主要从事植物营养与土壤肥料研究,E-mail: xingsj-126@126.com

activity was increased by 29.53%, 14.88%, 27.81% and 7.82% compared to the treatments of CK, U, S and SUM, respectively. At the same time, the values of AWCD and indexes of Shannon and McIntosh were significantly higher in the SUG treatment than in the other treatments, while the Simpson index was decreased by the SUG treatment, indicative of 28.78%, 30.22%, 26.91% and 8.39% increases in Shannon index over the treatments of CK, U, S and SUM. Additionally, the SUG treatment obviously promoted the growth of ground diameter and plant height, and had significant differences with other treatments. However, in S and SUM treatments, less effect on soil enzyme activity and microbial diversity was observed than in SUG treatment, which indicated that the gel way could significantly improve the drought adaptability of *Platycladus orientalis* compared with the ways of SAP application alone and mixture of SAP and urea. As a result, the gel was beneficial to improve the micro-ecological environment of rhizosphere soil, enhance the ability of drought resistance and promote growth of *Platycladus orientalis*.

Key words: super absorbent polymers; gel; *Platycladus orientalis*; rhizosphere; soil enzyme activity; microbial diversity

引言

土壤水分是干旱和半干旱地区植被恢复、造林成败的关键限制因子,而生态环境的持续恶化使干旱越来越严重^[1-2]。部分地区虽然雨量充沛,但降水的季节性波动很大,经常出现季节性的干旱,从而导致造林的“三低”现象——成活率低、保存率低、林木生长量低^[3-4]。因此,如何在干旱生境下提高造林质量,已成为该区域亟待解决的问题。

保水剂亦叫高吸水性树脂、高分子吸水剂,是利用强吸水性树脂制成的一种具有超高吸水、保水能力的高分子聚合物,具有特殊的保水、节水与抗旱性能^[5-6]。当前保水剂在造林中的常见应用方式有保水剂和肥料混施^[7]及保水剂结合生根粉^[8]、覆秸秆^[9]、覆膜^[10]等。保水剂吸附能力强,对于一些非离子型溶液具有较强的吸附能力^[11]。由此推测,可以将保水剂吸附一定浓度的尿素溶液而制成凝胶进行应用,但目前关于这方面在造林中的研究和应用相对较少,尤其针对林木根际土壤酶活性和微生物功能多样性的研究更是鲜有报道。根际是由土壤-微生物-酶组成的一个特殊微生态系统,是水分与各种养分物质进入根系并参与物质循环和能量转化的重要场所之一,为与原土体差异较大的特殊土壤微区^[12-13]。土壤酶是土壤生态系统中最活跃的组分,其活性可表征土壤生物活性,同时也是土壤功能最重要的指标^[14-15]。土壤酶与微生物不仅是土壤有机物转化的执行者,还是植物营养元素的活性库^[16]。土壤微生物及其参与下的物质转化是农林业生态系统持续发展的基础^[17],而且较高的土壤微生物活性通常是土壤肥沃的标志^[18]。维持土壤微生物功能多样性对于提高农林业生产力、抑制土传

病害及增强土壤缓冲能力具有重要意义^[19-20]。土壤微生物多样性与酶活性能敏感地反映生态系统的功能演变和环境胁迫等的影响,并可揭示土壤微生物种类与功能的差异^[15]。在土壤生态环境中,土壤酶活性与微生物多样性受诸多环境因素的影响,其中土壤含水率和养分供应是重要限制因子^[21]。而保水剂的施用能明显改变土壤水分条件,进而影响土壤有机质组分、通气状况及土壤微生物活性^[6]。还有研究表明^[22],保水剂可以通过改善土壤物理性状而进一步影响土壤供肥性与根系活性。由此可见,施用保水剂首先会影响土壤含水率、透气性及养分水平,进而可能会改变根际土壤微生物特性^[23]。而不同的保水剂施用方式对土壤微生态环境的作用效果各异^[24],这表明保水剂的施用方式可能对土壤酶活性及微生物多样性的影响具有关键性作用。

侧柏(*Platycladus orientalis*)具有防风固沙、保持水土的效能,是我国营造海岸林与荒山荒滩造林的先锋树种^[25],同时亦是国内最广泛应用的园林绿化树种之一。本研究以侧柏裸根苗为试材,对施用保水剂条件下的侧柏根际土壤酶和微生物进行探讨研究,以明确根际土壤酶活性和微生物功能多样性对保水剂不同施用方式的敏感程度,并阐明保水剂抗旱促生长的土壤生态学机理,为改善侧柏根际土壤微生态环境和提高造林质量提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于2014年3—10月在山东省林业科学研究院的大棚内进行,供试土壤为潮土,其碱解氮、速

效磷、速效钾质量比分别为 30.89、32.75、75.16 mg/kg, pH 值为 7.79, 田间持水量为 32.26%。供试植物为山东省林业科学研究院培育的一年生侧柏无纺布裸根苗, 平均地径(2.68 ± 0.09) mm, 平均株高(20.79 ± 0.98) cm。所用保水剂为 XL 型丙烯酰胺-丙烯酸钾交联共聚物, 粒径为 1.6 ~ 4.0 mm, 其阴离子度为 12.30%, 含水率为 9.70%, 吸纯水倍数为 350, 吸 1 000 mg/kg NaCl 水溶液倍数为 180。所用化肥为尿素(含 N 质量分数 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 质量分数 12%)和氯化钾(含 K₂O 质量分数 60%)。

1.2 保水剂对尿素的吸附能力

在 25℃ 条件下, 1 mL 水溶液能溶解 1.1 g 尿素, 溶解后的体积约为 1.75 mL。1 g 保水剂最大可吸附 85 mL 尿素近饱和溶液, 即 1 g 保水剂最大可吸附约 48.5 g 尿素。

1.3 试验设计

采用盆栽试验, 盆规格为高 25 cm、宽 30 cm, 每盆栽土 12 kg。试验共设 5 个处理: CK: 对照, 不施肥和保水剂; U: 单施尿素; S: 单施保水剂; SUM: 保水剂与尿素混施; SUG: 保水剂-尿素凝胶。其中, U、S、SUM、SUG 处理的过磷酸钙和氯化钾施用量一致, 作为底肥一次性施入; S、SUM、SUG 处理的保水剂用量均为土壤质量的 0.2% (24 g/盆); U、SUM、SUG 处理的尿素施用量均为 4.35 g, 其中 SUM 处理是将尿素和保水剂混合后均匀撒施于侧柏的四周, 而 SUG 处理是先将 43.5 g 尿素放在烧杯中完全溶解, 然后用 240 g 保水剂吸附尿素溶液, 制作成保水剂-尿素凝胶, 并将凝胶 10 等分, 分别均匀撒施于侧柏的四周。每个处理 10 盆, 每盆栽植 1 株苗, 于 2014 年 3 月 28 日植入塑料盆内, 放置在山东省林业科学研究院的试验大棚内, 雨天用防雨棚遮雨, 晴天露地生长。定植时浇水至田间持水量的 85%, 每天定时浇水, 维持土壤含水率为田间持水量的 75% ~ 80%。缓苗后, 4 月 20 日开始干旱胁迫试验, 利用时域反射仪 TDR 连接 P3 型土壤水分探针于每天 09:00 检测土壤含水率, 水分不足时用量杯进行补水, 并记录加水量, 保证所有处理的土壤含水率均控制在 40% ~ 45% 的田间持水量水平。

1.4 测定项目与方法

2014 年 8 月 26 日, 选取每株幼苗从顶端往下第 3 ~ 5 片完全舒展且成熟的功能叶, 利用美国 CID 公司 CI-310 型便携式光合仪, 于 09:00—11:00 测定叶片的净光合速率(P_n), 然后采集叶片进行相对含水率和相对电导率的测定。其中叶片的相对含水率采用烘干法测定, 计算公式为

$$A = (B - C) / (D - C) \times 100\%$$

式中 A——叶片相对含水率, %

B——叶片鲜生物量, g

C——叶片干生物量, g

D——叶片饱和和鲜生物量, g

叶片的相对电导率采用电导法测定。

2014 年 10 月 12 日, 首先测定地径和株高, 然后采用剥落分离法^[26] 采集根际土样, 混匀, 每个处理采集 5 盆(即重复 5 次), 分别用灭菌的塑料袋包扎密封。一部分新鲜土样立即进行土壤微生物功能多样性的测定, 一部分风干过 1 mm 筛, 用于测定土壤酶活性。

土壤微生物功能多样性: 采用 BIOLOG 微生物自动分析系统进行分析。称取 5 g 新鲜土样置于 50 mL 无菌的 0.85% (以下均为质量分数) NaCl 溶液中, 在 175 r/min 下振荡 30 min。用无菌的 0.85% NaCl 溶液稀释至 200 倍后, 再用 8 通道加样器向 BIOLOG Eco 微孔板各孔中分别添加 150 μL 稀释后的悬液, 25℃ 恒温培养, 每隔 24 h 在 BIOLOG 自动读盘机上读取波长 590 nm 和 750 nm 下的吸光度。参照 ZHONG 等^[27] 的方法计算平均吸光度(AWCD)和多样性指数, 选取 96 h 的数据进行分析和多样性指数的计算。

土壤过氧化氢酶的测定采用高锰酸钾滴定法, 脲酶的测定采用苯酚钠-次氯酸钠比色法, 多酚氧化酶的测定采用邻苯三酚比色法, 蔗糖酶的测定采用 Na₂S₂O₃ 滴定法^[28]。

根系分泌物采用层析滤纸定位收集法^[29]: 准备若干直径为 5 mm 的层析滤纸片, 用甲醇清洗 3 次, 再用重蒸水清洗 3 次, 在无菌条件下晾干备用。收集时从不同处理中各挑选 5 株生长一致的裸根苗, 先将植物根系在去离子水中清洗数次, 以除去表面的营养元素, 然后将根系平放于铺有湿滤纸的瓷盘中, 并在根系的上、下方分别放置预先处理好的层析滤纸片。最后用黑塑料布将整个根系罩住, 在光照下收集 4 h。收集完后, 将每个植株不同部位的滤纸片放入 2.5 mL Ependorf 管中, 每 10 个滤纸片加 300 μL 重蒸水放入液氮中保存。测定前将其溶解, 12 000 r/min 离心 10 min, 取上清液即为根系分泌物。根系分泌物中氨基酸总量采用甲醛滴定法测定, 有机酸总量采用液相色谱仪法测定, 总糖采用蒽酮比色法测定^[30]。

1.5 统计分析

采用 Excel 2013 处理数据并制图, 采用 SPSS 11.5 软件进行方差分析和多重比较(Least significant difference, LSD)。表 1 ~ 4 中数据形式为“平均值 ± 标准差”。

2 结果与分析

2.1 根系分泌物

在植物生长过程中,根系从土壤中吸收水分、养分的同时,也会向生长介质中分泌质子,释放无机离子,溢泌或分泌大量有机物,即根系分泌物^[30]。由表1可以看出,不同处理对侧柏根系分泌物含量的影响具有明显差异。SUG处理的氨基酸总量和有机酸总量均最高,并显著高于其他处理,分别较U处理提高25.94%和40.75%,分别较SUM处理提高12.35%和14.17%;SUG处理的总糖含量与SUM处理无显著性差异,但仍明显高于CK、U、S处理。SUM处理的氨基酸总量、有机酸总量和总糖含量均明显高于CK、U、S处理。S处理的氨基酸总量、有机酸总量显著低于U处理,而总糖含量与U处理差异未达显著水平。以上分析可知,保水剂的3种不同施用方式对侧柏根系分泌物含量产生了迥然不同的作用效果,其中以保水剂-尿素凝胶方式对氨基酸总量、有机酸总量和总糖含量的提高幅度最大。

表1 不同处理对侧柏根系分泌物含量的影响

Tab.1 Effects of different treatments on root exudates content of *P. orientalis*

处理	氨基酸质量比/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机酸质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	总糖质量比/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	341.79 ± 10.57 ^d	21.45 ± 1.53 ^e	12.58 ± 0.84 ^b
U	380.47 ± 15.08 ^c	32.91 ± 1.36 ^c	13.19 ± 0.63 ^b
S	348.96 ± 12.61 ^d	25.66 ± 0.98 ^d	12.83 ± 0.45 ^b
SUM	426.52 ± 20.43 ^b	40.57 ± 2.42 ^b	17.26 ± 0.61 ^a
SUG	479.18 ± 16.22 ^a	46.32 ± 1.29 ^a	18.05 ± 0.37 ^a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.2 根际土壤酶活性

土壤过氧化氢酶能在一定程度上表征土壤生物氧化过程的强弱与土壤微生物活动强度,在有机质氧化与腐殖质形成过程中起着重要作用;而脲酶、多酚氧化酶和蔗糖酶作为3种水解酶参与高分子有机化合物的水解反应,对于丰富土壤中能被微生物和植物利用的可溶性营养物质有重要作用^[14]。从表2可见,SUG处理的过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶和蔗糖酶活性均最高,并明显高于其他处理,其中过氧化氢酶活性分别比CK、U、S、SUM处理高出25.00%、21.62%、23.85%、6.30%,脲酶活性分别高出29.53%、14.88%、27.81%、7.82%;其次是SUM处理,其过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性均显著高于CK、U和S处理,而多酚氧化酶活性与U处理差异不显著,但亦明显高于CK和S处理;S处理的过氧化氢酶活性与U处理差异未达显著水平,而脲酶、

多酚氧化酶和蔗糖酶活性均明显低于U处理。由此可见,保水剂的施用方式对侧柏根际土壤酶活性具有至关重要的作用,在3种不同方式中,以保水剂-尿素凝胶对土壤酶活性的增强作用最为明显。

表2 不同处理对侧柏根际土壤酶活性的影响

Tab.2 Effects of different treatments on enzyme activities in rhizosphere soil of *P. orientalis*

处理	过氧化氢酶活性 ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	脲酶活性 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	多酚氧化酶活性 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	蔗糖酶活性 ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
CK	1.08 ± 0.05 ^c	1.49 ± 0.02 ^d	0.65 ± 0.02 ^d	1.78 ± 0.26 ^c
U	1.11 ± 0.05 ^c	1.68 ± 0.04 ^c	0.85 ± 0.03 ^b	2.59 ± 0.08 ^c
S	1.09 ± 0.02 ^c	1.51 ± 0.04 ^d	0.71 ± 0.02 ^c	2.14 ± 0.05 ^c
SUM	1.27 ± 0.03 ^b	1.79 ± 0.02 ^b	0.86 ± 0.03 ^b	2.86 ± 0.15 ^b
SUG	1.35 ± 0.02 ^a	1.93 ± 0.05 ^a	0.97 ± 0.06 ^a	3.48 ± 0.22 ^a

2.3 根际土壤微生物功能多样性

由表3可以看出,不同处理的平均吸光度(AWCD)和均匀度指数呈现出一致的变化规律:SUG处理的AWCD和均匀度指数显著高于其他处理,分别较U处理高出32.35%和46.69%,分别较SUM处理高出14.41%和13.84%;其次是SUM处理,也明显高于CK、U、S处理;而CK、S处理明显低于U处理。各处理丰富度指数由大到小为SUG、SUM、S、CK、U,其中S、CK、U处理丰富度指数近似相等,SUG处理的丰富度指数达最高值,分别比CK、U、S、SUM处理显著提高28.78%、30.22%、26.91%、8.39%,而CK、U、S处理之间差异未达显著水平。从表3还可知,SUG处理的优势度指数最低,分别较CK、U、S、SUM处理明显降低17.89%、12.36%、17.02%、6.02%;依次是SUM、U处理,亦显著低于CK、S处理,而CK、S处理无显著性差异。数据表明,保水剂-尿素凝胶方式能显著提高侧柏根际土壤微生物的丰富度指数和均匀度指数,但明显降低了优势度指数。

表3 不同处理对侧柏根际土壤微生物AWCD和多样性指数的影响

Tab.3 Effects of different treatments on AWCD and diversity index in rhizosphere soil of *P. orientalis*

处理	平均吸光度	丰富度指数	优势度指数	均匀度指数
CK	0.73 ± 0.15 ^d	2.71 ± 0.11 ^c	0.95 ± 0.02 ^a	3.25 ± 0.49 ^d
U	1.02 ± 0.06 ^c	2.68 ± 0.24 ^c	0.89 ± 0.02 ^b	4.99 ± 0.64 ^c
S	0.76 ± 0.13 ^d	2.75 ± 0.09 ^c	0.94 ± 0.01 ^a	3.58 ± 0.27 ^d
SUM	1.18 ± 0.06 ^b	3.22 ± 0.18 ^b	0.83 ± 0.02 ^c	6.43 ± 0.31 ^b
SUG	1.35 ± 0.08 ^a	3.49 ± 0.05 ^a	0.78 ± 0.01 ^d	7.32 ± 0.45 ^a

2.4 生理特性与地径、株高生长

从表4可以看出,各处理的侧柏叶片净光合速

率由大到小为SUG、SUM、U、S、CK,且处理间差异均达显著水平,其中SUG处理的净光合速率分别较CK、U、S、SUM处理明显提高23.70%、15.09%、20.93%、10.39%。S、SUM、SUG处理较CK、U处理显著提高了叶片的相对含水率,而在3个保水剂处理中,SUG、SUM处理无显著性差异,但明显高于S处理。同时,与CK相比,保水剂或施肥措施均明显降低了叶片的相对电导率,其中SUG处理显著低于其他处理。从表4还可见,U、S、SUM、SUG处理相比CK均能明显促进侧柏地径与株高的生长,以

SUG处理的作用效果最显著,其地径分别比CK、U、S、SUM处理明显提高23.94%、10.23%、11.86%、5.39%,株高分别明显提高49.25%、22.82%、44.18%、12.85%;其次为SUM处理,其地径和株高亦显著高于CK、U、S处理;而S处理的地径与U处理差异不显著,但株高却明显低于U处理。以上分析认为,保水剂-尿素混施和凝胶相比其他处理能显著提高侧柏的干旱适应能力,并明显促进侧柏的生长,其中保水剂-尿素凝胶方式的效果更为明显。

表4 不同处理对侧柏叶片生理特性及生长的影响

Tab.4 Effects of different treatments on leaf physiological property and growth of *P. orientalis*

处理	净光合速率/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	相对含水率/%	相对电导率/%	地径/mm	株高/cm
CK	4.81 ± 0.04 ^e	62.18 ± 1.10 ^d	57.95 ± 0.37 ^a	4.26 ± 0.17 ^d	32.71 ± 1.82 ^d
U	5.17 ± 0.10 ^e	66.02 ± 1.48 ^e	53.08 ± 0.69 ^b	4.79 ± 0.06 ^e	39.75 ± 0.79 ^e
S	4.92 ± 0.05 ^d	69.84 ± 0.71 ^b	52.62 ± 0.55 ^b	4.72 ± 0.10 ^e	33.86 ± 2.65 ^d
SUM	5.39 ± 0.07 ^b	72.65 ± 1.29 ^a	46.25 ± 1.42 ^c	5.01 ± 0.06 ^b	43.26 ± 2.08 ^b
SUG	5.95 ± 0.18 ^a	74.29 ± 1.04 ^a	42.19 ± 1.18 ^d	5.28 ± 0.04 ^a	48.82 ± 1.95 ^a

3 讨论

土壤酶主要来自微生物与植物根系的分泌作用,既是土壤肥力的一个重要标志,也是土壤有机养分转化的一个重要因素^[19,31]。其中根际土壤过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶和蔗糖酶活性之间的关系及总体活性对评价土壤肥力水平具有重要意义^[12]。本试验研究得出,保水剂-尿素混施或凝胶处理较对照和单施尿素能明显提高侧柏根际土壤过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶和蔗糖酶活性,以保水剂-尿素凝胶方式更为显著,而单施保水剂方式下脲酶、多酚氧化酶和蔗糖酶活性显著低于单施尿素处理。这与崔娜等^[32]的研究结论基本一致。这一方面可能是由于保水剂-尿素凝胶具有缓慢释放氮素的特性,有利于协调土壤碳氮比^[33],改善土壤理化性状,有助于土壤微生物和侧柏的生长^[34];另一方面可能与凝胶能明显提高根系分泌物中氨基酸总量、有机酸总量和总糖含量有关,使土壤微生物繁殖加快^[35-36],从而有利于土壤酶活性的提高。这也说明保水剂的3种不同施用方式对侧柏根际土壤酶活性产生迥然不同的作用效果,而凝胶方式可通过改善土壤微生物活性和植物根系来增强土壤酶活性^[37]。

BIOLOG分析中平均吸光度(AWCD)是土壤微生物群落利用单一碳源能力的一个重要指标,能表征微生物群落的碳源利用率,亦能反映土壤微生物活性和微生物群落生理功能多样性^[38]。本研究得出,同对照相比,单施尿素、保水剂-尿素混施和凝胶处理均显著提高了根际土壤微生物AWCD,其中凝

胶处理取得最大值,而单施保水剂处理与对照差异不显著。造成这一差异主要是由于不同保水剂施用方式下土壤微域生境的改变所致,这种改变影响了多种微生物的适宜性,所以影响了微生物对碳源的选择性利用^[39]。这也表明凝胶方式下侧柏根际土壤微生物对底物的利用能力强,土壤碳素的周转速率快,促进有机质的分解。均匀度指数表征了土壤微生物群落的均匀度^[40],从试验数据可知其变化趋势和AWCD基本一致。丰富度指数能反映土壤微生物群落的丰富度^[41]。本试验中,保水剂-尿素混施或凝胶处理较对照和单施尿素能明显提高丰富度指数,而单施保水剂则与对照、单施尿素处理差异不显著。这与刘洋等^[42]在干旱山地新植核桃园土壤上的研究结论基本相符。究其原因可能在于:①保水剂的施用能降低土壤容重、增加通透性,改善土壤微生态环境^[6],而保水剂-尿素混施或凝胶还可以增强土壤的保水性、供肥性^[43],能保证根系有相对充足的水分、养分供应,有利于提高根系活性^[44],从而能加强根系代谢与微生物之间的交流^[45]。②保水剂-尿素混施或凝胶能显著提高根系分泌物含量,而根系分泌物是根际土壤微生物的主要碳源与能源,且可通过改变根际pH值、氧化还原电位及螯合作用来影响根际元素的溶解度与有效性^[30],进而影响微生物的代谢,并直接或间接影响根际土壤微生物多样性^[46]。进一步分析发现,凝胶方式下的丰富度指数最高,并显著高于混施方式。这可能是由于凝胶相比混施方式能更显著地提高氮素利用率^[47],有效减少了肥料的浪费,改善了土壤的养分状况,能

较好地满足侧柏在生长期对养分的需求,从而为土壤微生物群落多样性的提高创造良好的营养条件^[48]。优势度指数评估土壤微生物群落的优势度^[40]。本研究中其呈现出与丰富度指数、均匀度指数相反的变化趋势。这与李华等^[40]利用滴灌在黄瓜根际土壤上的研究结果相似。可见,在3种保水剂的不同利用方式中,保水剂-尿素凝胶能使侧柏根际土壤微生物群落功能多样性更明显地升高,微生物区系得以改善,这可能与根际土壤酶活性的提高有一定关联^[46]。

侧柏的生长发育受诸多因素的影响,而保水剂的施用能改变根际土壤的供水、通气环境^[6,49],进而影响侧柏的生长。本研究中,保水剂-尿素凝胶对侧柏地径和株高生长的促进效果最显著。可能由于凝胶是保水剂将尿素溶液固定在保水剂晶格中,延缓了氮素的释放速率^[50],并延长供肥时间,显著减少肥料的淋溶与流失^[47],从而能在干旱生境中为侧柏根系生长提供较充足的营养资源。综上可知,保水剂-尿素凝胶通过改善根际土壤物理环境、提供丰富的资源,进一步提高了根际土壤酶活性与微生物多样性,使土壤生物活性增强,从而有效改善侧柏根系生长的微生态环境条件,明显增强侧柏的抗干旱能力。与单施保水剂和保水剂-尿素混施方式相比,凝

胶方式能更显著地提高造林质量。进一步印证了保水剂的施用方式对侧柏的造林效应具有决定性作用。

4 结论

(1) 在保水剂的3种不同施用方式中,保水剂-尿素凝胶或混施可明显增加侧柏根系分泌物中氨基酸总量、有机酸总量和总糖含量,并能显著提高根际土壤过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶和蔗糖酶活性,其中凝胶方式对根系分泌物含量和土壤酶活性的提高作用最显著。

(2) 保水剂-尿素凝胶或混施方式明显提高了根际土壤微生物AWCD、丰富度指数和均匀度指数,其中凝胶方式对根际土壤微生物多样性指数的提高幅度显著大于混施方式。

(3) 保水剂-尿素凝胶方式能显著改善侧柏叶片的生理特性,明显促进侧柏地径与株高的生长,且促进效果显著优于单施保水剂和混施方式。

(4) 在3种不同的保水剂施用方式中,保水剂-尿素凝胶方式较单施保水剂和混施方式更有利于改善侧柏根际土壤微生态环境,增强抵御干旱胁迫的能力,并促进生长。

参 考 文 献

- 刘方春,马海林,马丙尧,等.干旱环境下接种根际促生细菌对核桃苗光合特性的影响[J].林业科学,2015,51(7):84-90.
LIU Fangchun, MA Hailin, MA Bingyao, et al. Effect of plant growth-promoting rhizobacteria on photosynthetic characteristics in walnut seedlings under drought stress[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7): 84-90. (in Chinese)
- XIE Xianhong, LIANG Shunlin, YAO Yunjun, et al. Detection and attribution of changes in hydrological cycle over the Three-North Region of China: climate change versus afforestation effect[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2015, 213:74-87.
- LIU Wei, MI Jia, SONG Zhihong, et al. Long-term water balance and sustainable production of miscanthus energy crops in the Loess Plateau of China[J]. Biomass and Bioenergy, 2014, 62:47-57.
- 蔡甲冰,许迪,司南,等.基于冠层温度和土壤墒情的实时监测与灌溉决策系统[J].农业机械学报,2015,46(12):133-139.
CAI Jiabing, XU Di, SI Nan, et al. Real-time monitoring system of crop canopy temperature and soil moisture for irrigation decision-making[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 133-139. (in Chinese)
- 杨永辉,武继承,赵世伟,等.保水剂用量对农田生态系统碳足迹的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):126-131.
YANG Yonghui, WU Jicheng, ZHAO Shiwei, et al. Impact of super absorbent polymers dosage on carbon footprint of farmland ecological system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 126-131. (in Chinese)
- 井大炜,邢尚军,刘方春,等.畦灌配施保水剂改善杨树林下土壤物理性状提高微生物活性[J].农业工程学报,2015,31(14):116-122.
JING Dawei, XING Shangjun, LIU Fangchun, et al. Border irrigation co-applied with super absorbent polymers improving soil physical characteristics and increasing microbial activity in poplar forest[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 116-122. (in Chinese)
- 刘方春,马海林,马丙尧,等.容器基质育苗中保水剂对白蜡生长及养分和干物质积累的影响[J].林业科学,2011,47(9):62-68.
LIU Fangchun, MA Hailin, MA Bingyao, et al. Effect of super absorbent polymer on container seedling growth of *Fraxinus chinensis* and the nutrient and dry matter accumulation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(9): 62-68. (in Chinese)
- 班卫强,尹林克,严成.不同技术措施对梭梭免灌造林成活率的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(7):141-144.
BAN Weiqiang, YIN Linke, YAN Cheng. Effect of techniques on survival rates of *Haloxylon Ammodendron* afforestation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(7): 141-144. (in Chinese)

- 9 韩艳英, 叶彦辉, 张昆林, 等. 不同造林技术措施对藏川杨生理生化特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 101-104.
HAN Yanying, YE Yanhui, ZHANG Kunlin, et al. Effects of different afforestation technique on the physiological and biochemical characteristics of *Populus szechuanica* var. *tibetica*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(6): 101-104. (in Chinese)
- 10 李庆梅, 侯龙鱼, 刘艳, 等. 石质山地君迁子直播造林试验[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 72-76.
LI Qingmei, HOU Longyu, LIU Yan, et al. Direct seeding of *Diospyros lotus* in rocky hills[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(6): 72-76. (in Chinese)
- 11 GE Huacai, WANG Senkang. Thermal preparation of chitosan-acrylic acid superabsorbent: optimization, characteristic and water absorbency[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 113:296-303.
- 12 CHAUDHARY D R, GAUTAM R K, YOUSUF B, et al. Nutrients, microbial community structure and functional gene abundance of rhizosphere and bulk soils of halophytes[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 91:16-26.
- 13 MIMMO T, DEL BUONO D, TERZANO R, et al. Rhizospheric organic compounds in the soil-microorganism-plant system: their role in iron availability[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(5): 629-642.
- 14 王伟东, 王渭玲, 徐福利, 等. 秦岭西部中幼龄华北落叶松林地土壤养分与酶活性特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1032-1039.
WANG Weidong, WANG Weiling, XU Fuli, et al. Characteristics of soil nutrients and enzyme activities in young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* plantation in western Qinling Mountains [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4): 1032-1039. (in Chinese)
- 15 FANG Shengzuo, LIU Dong, TIAN Ye, et al. Tree species composition influences enzyme activities and microbial biomass in the rhizosphere: a rhizobox approach[J]. PLOS ONE, 2013, 8(4):1-11.
- 16 丁少男, 薛薏, 刘国彬. 施肥处理对黄土丘陵区农田土壤酶活性和水溶性有机碳、氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2146-2154.
DING Shaonan, XUE Sha, LIU Guobin. Effects of fertilization on soil enzyme activities and water-soluble organic carbon and nitrogen content in farmland on Hilly Loess Plateau[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(11): 2146-2154. (in Chinese)
- 17 祝丽香, 闫文秀, 李雪, 等. 控释尿素与尿素配施对抗白菊栽培土壤生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 226-233.
ZHU Lixiang, YAN Wenxiu, LI Xue, et al. Effects of combined use of controlled-release urea and conventional urea on biological properties of *Chrysanthemum morifolium* 'Hangbaiju' [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 226-233. (in Chinese)
- 18 夏昕, 石坤, 黄欠如, 等. 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 697-705.
XIA Xin, SHI Kun, HUANG Qianru, et al. The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 697-705. (in Chinese)
- 19 范富, 张庆国, 邹继承, 等. 玉米秸秆夹层改善盐碱地土壤生物性状[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 133-139.
FAN Fu, ZHANG Qingguo, TAI Jicheng, et al. Biological traits on corn straw interlayer in improving saline-alkali soil[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 133-139. (in Chinese)
- 20 LU Haifei, LASHARI M S, LIU Xiaoyu, et al. Changes in soil microbial community structure and enzyme activity with amendment of biochar-manure compost and pyrolytic solution in a saline soil from Central China[J]. European Journal of Soil Biology, 2015, 70:67-76.
- 21 叶德练, 齐瑞娟, 管大海, 等. 免耕冬小麦田土壤微生物特征和土壤酶活性对水分调控的响应[J]. 作物学报, 2015, 41(8): 1212-1219.
YE Delian, QI Ruijuan, GUAN Dahai, et al. Response of soil microbial characteristics and soil enzyme activity to irrigation method in no-till winter wheat field[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(8): 1212-1219. (in Chinese)
- 22 李中阳, 吕谋超, 樊向阳, 等. 不同类型保水剂对冬小麦水分利用效率和根系形态的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3753-3758.
LI Zhongyang, LÜ Mouchao, FAN Xiangyang, et al. Influences of different kinds of water retentive agents on water use efficiency and root morphology of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3753-3758. (in Chinese)
- 23 侯贤清, 李荣, 何文寿, 等. 2种保水剂对旱作土壤物理性状及马铃薯产量的影响比较[J]. 核农学报, 2015, 29(12): 2410-2417.
HOU Xianqing, LI Rong, HE Wenshou, et al. Comparative effects of two super absorbent on soil physical properties of dryland and potato yield[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(12): 2410-2417. (in Chinese)
- 24 杜社妮, 耿桂俊, 于健, 等. 保水剂施用方式对河套灌区土壤水热条件及玉米生长的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 270-276.
DU Sheni, GENG Guijun, YU Jian, et al. Effects of super absorbent applied by different methods on soil moisture, soil temperature and maize growth[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(5): 270-276. (in Chinese)
- 25 JIANG Yuan, WANG Bingqin, DONG Manyu, et al. Response of daily stem radial growth of *Platycladus orientalis* to

- environmental factors in a semi-arid area of North China[J]. *Trees*, 2015, 29(1):87-96.
- 26 WANG X P, ZABOWSKI D. Nutrient composition of Douglas-fir rhizosphere and bulk soil solutions [J]. *Plant Soil*, 1998, 200(1): 13-20.
- 27 ZHONG W, CAI Z. Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community functional diversity in a paddy soil derived from quaternary red clay[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 36:84-91.
- 28 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- 29 涂书新, 吴佳. 植物根系分泌物研究方法评述[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(9): 2493-2500.
- TU Shuxin, WU Jia. A review on research methods of root exudates[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(9): 2493-2500. (in Chinese)
- 30 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 298-310.
- WU Linkun, LIN Xiangmin, LIN Wenxiong. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(3): 298-310. (in Chinese)
- 31 CHENG Fei, PENG Xiaobang, ZHAO Peng, et al. Soil microbial biomass, basal respiration and enzyme activity of main forest types in the Qinling Mountains[J]. *PLOS ONE*, 2013, 8(6):1-12.
- 32 崔娜, 张玉龙, 曲波, 等. 保水剂对苗期番茄根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. *北方园艺*, 2010(23):24-26.
- CUI Na, ZHANG Yulong, QU Bo, et al. Effects of super absorbent polyers on soil microbe amounts and enzyme activities of rhizosphere in tomato seedling[J]. *Northern Horticulture*, 2010(23):24-26. (in Chinese)
- 33 廖人宽, 杨培岭, 任树梅, 等. 农用除草剂对土壤保水剂吸液性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4):125-132.
- LIAO Renkuan, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of agricultural herbicide on water absorption characteristic of super absorbent polymer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(4): 125-132. (in Chinese)
- 34 BAI W, ZHANG H, LIU B, et al. Effects of super-absorbent polymers on the physical and chemical properties of soil following different wetting and drying cycles[J]. *Soil Use and Management*, 2010, 26(3): 253-260.
- 35 梁儒彪, 梁进, 乔明锋, 等. 模拟根系分泌物 C:N 化学计量特征对川西亚高山森林土壤碳动态和微生物群落结构的影响[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(5): 466-476.
- LIANG Rubiao, LIANG Jin, QIAO Mingfeng, et al. Effects of simulated exudate C:N stoichiometry on dynamics of carbon and microbial community composition in a subalpine coniferous forest of western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(5): 466-476. (in Chinese)
- 36 LI Xi, HE Jizheng, LIU Yurong, et al. Effects of super absorbent polymers on soil microbial properties and Chinese cabbage (*Brassica chinensis*) growth[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(4):711-719.
- 37 宫辛玲, 刘作新, 尹光华, 等. 土壤保水剂与氮肥的互作效应研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 50-54.
- GONG Xinling, LIU Zuoxin, YIN Guanghua, et al. Interactive effects of super absorbent polymer and nitrogenous fertilizer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(1): 50-54. (in Chinese)
- 38 NAIR A, NGOUAJIO M. Soil microbial biomass, functional microbial diversity, and nematode community structure as affected by cover crops and compost in an organic vegetable production system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 58:45-55.
- 39 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2792-2798.
- SUN Fengxia, ZHANG Weihua, XU Minggang, et al. Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon and nitrogen and on carbon source utilization of microbes in a red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2792-2798. (in Chinese)
- 40 李华, 贺洪军, 李腾飞, 等. 不同地下滴灌制度下黄瓜根际微生物活性及功能多样性[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2349-2354.
- LI Hua, HE Hongjun, LI Tengfei, et al. Microbial activity and functional diversity in rhizosphere of cucumber under different subsurface drip irrigation scheduling[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8):2349-2354. (in Chinese)
- 41 YUA C, HUA X M, DENG W, et al. Changes in soil microbial community structure and functional diversity in the rhizosphere surrounding mulberry subjected to long-term fertilization[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 86:30-40.
- 42 刘洋, 史薪钰, 陈梦华, 等. 不同保水措施对退化干旱山地新植核桃园土壤养分和微生物的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(4): 218-222.
- LIU Yang, SHI Xinyu, CHEN Menghua, et al. Effects of different water conversation measures on soil nutrients and microorganisms in newly planted walnut orchard in degraded drought mountain land[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(4): 218-222. (in Chinese)
- 43 王茹芳, 张夫道, 刘秀梅, 等. 胶结型缓释肥在小麦上应用效果的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3): 340-344.
- WANG Rufang, ZHANG Fudao, LIU Xiumei, et al. Responses of wheat to felted slow-release fertilizer[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(3): 340-344. (in Chinese)
- 44 林杰. 耐盐保水剂对滨海沙地厚荚相思生理和成活率的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(6): 92-97.
- LIN Jie. Effects of salt-resisting water retentive agent on physiology and survival rate of *Acacia crassicarpa* in coastal sandy soil

- [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(6): 92-97. (in Chinese)
- 45 王清奎, 李艳鹏, 张方月, 等. 短期施氮肥降低杉木幼林土壤的根系和微生物呼吸[J]. 植物生态学报, 2015, 39(12): 1166-1175.
WANG Qingkui, LI Yanpeng, ZHANG Fangyue, et al. Short-term nitrogen fertilization decreased root and microbial respiration in a young *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(12): 1166-1175. (in Chinese)
- 46 RASHEDUL I M, CHAUHAN P S, YOOHAK K, et al. Community level functional diversity and enzyme activities in paddy soils under different long-term fertilizer management practices[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(5): 599-604.
- 47 何绪生, 廖宗文, 黄培钊, 等. 一种新型保水缓释氮肥有关特征及性能[J]. 中国农业科学, 2006, 39(10): 2048-2055.
HE Xusheng, LIAO Zongwen, HUANG Peizhao, et al. Characteristics and performance of a new water-absorbent slow release nitrogen fertilizer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(10): 2048-2055. (in Chinese)
- 48 LUGLIA M, CRIQUET S, SARRAZIN M, et al. Functional patterns of microbial communities of rhizospheric soils across the development stages of a young mangrove in French Guiana[J]. Microbial Ecology, 2014, 67(2): 302-317.
- 49 HAN Yuguo, YANG Peiling, LUO Yuanpei, et al. Porosity change model for watered super absorbent polymer-treated soil[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(6): 1197-1205.
- 50 何绪生, 黄培钊, 廖宗文, 等. 保水缓释氮肥水分状态与吸持特征研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 10-15.
HE Xusheng, HUANG Peizhao, LIAO Zongwen, et al. State and retention characteristics of water in hydrogel of water absorbent slow release nitrogen fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 10-15. (in Chinese)

(上接第 145 页)

- 27 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 44-47.
CHEN Hongsong, SHAO Ming'an, WANG Kelin. Effects of initial water content on hillslope rainfall infiltration and soil water redistribution[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 44-47. (in Chinese)
- 28 郭延辅, 段巧甫. 水土保持径流调控理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 21.
- 29 罗利芳, 张科利, 李双才. 撂荒后黄土高原坡耕地土壤透水性和抗冲性的变化[J]. 地理科学, 2003, 23(6): 728-733.
LUO Lifang, ZHANG Keli, LI Shuangcai. Change in soil permeability and anti-scourability of farmland after abandonment[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(6): 728-733. (in Chinese)
- 30 王一峰, 张平仓, 朱兵兵, 等. 长江中上游地区土壤抗冲性特征研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(1): 12-15.
WANG Yifeng, ZHANG Pingcang, ZHU Bingbing, et al. Features of soil anti-scourability in upper-middle reaches of Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(1): 12-15. (in Chinese)
- 31 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 490-495.
PAN Chengzhong, SHANGGUAN Zhouping. Hydraulic characteristics of silt-laden flow on different gradient grassplots and its mechanism of sediment retention[J]. Advance in Water Science, 2007, 18(4): 490-495. (in Chinese)
- 32 唐涛, 郝明德, 单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 9-11, 40.
TANG Tao, HAO Mingde, SHAN Fengxia. Effects of straw mulch application on water loss and soil erosion under simulated rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 9-11, 40. (in Chinese)
- 33 SHAINBERG I, MAMEDOV A I, LEVY G J. Role of wetting rate and rain energy in seal formation and erosion 1[J]. Soil Science, 2003, 168(1): 54-62.
- 34 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 632-635.
TANG Zejun, LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, et al. Quantitative determination of the impacts of raindrop splash and crust on soil erosion with ree experimental data[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 632-635. (in Chinese)
- 35 郑子成, 何淑勤, 吴发启. 降雨条件下地表糙度对片蚀的影响及其变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊1): 139-145.
ZHENG Zicheng, HE Shuqin, WU Faqi. Effects of soil surface roughness on sheet erosion and change under different rainfall conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 1): 139-145. (in Chinese)
- 36 WHELAN M J, ANDERSON J M. Modeling spatial patterns of throughfall and interception loss in a Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale[J]. Journal of Hydrology, 1996, 186: 335-354.
- 37 DORING T F, BRANDT M, HESS J, et al. Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes[J]. Field Crops Research, 2005, 94(2-3): 238-249.
- 38 郑子成, 吴发启, 何淑勤, 等. 地表糙度对径流和产沙影响的室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 19-24.
ZHENG Zicheng, WU Faqi, HE Shuqin, et al. Effects of soil surface roughness on runoff and sediment discharges with laboratory experiments[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(10): 19-24. (in Chinese)
- 39 贾延明, 尚长青, 张振国. 保护性耕作适应性试验及关键技术研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 78-81.
JIA Yanming, SHANG Zhangqing, ZHANG Zhenguo. Adaptability test and key technology research on conservation tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 78-81. (in Chinese)