

不同水分条件下先锋植物博落回对 氮磷胁迫的生物学响应

王慧, 孙泰森*

(山西农业大学资源与环境学院, 山西太谷 030801)

摘要:【目的】由于在 2008 年 9 月 8 日, 山西省襄汾县发生尾矿库特别重大溃坝事故, 造成下游农田土壤被溃坝物覆盖, 严重影响了土壤性状和生产力。为了研究该区被尾矿污染土壤的修复问题, 本文利用溃坝覆盖后的尾矿与表土混合形成的生土为栽培基质, 通过盆栽土培试验研究不同水分条件下施氮与施磷处理对修复植物博落回的生长及生理状况、根际土壤酶活性和微生物数量的影响, 以期为襄汾“9.8”溃坝区种植作物的筛选与管理提供理论依据。【方法】试验于 2013 年 3 月至 12 月在山西农业大学实验农场内进行。试验设低水(田间持水量的 35%~40%, W_1)、中水(田间持水量的 45%~50%, W_2)和高水(田间持水量的 75%~80%, W_3) 3 个水分处理, 在此基础上设中氮($N\ 0.2\ g/kg$, N_1)、低氮(不施氮, N_0)以及中磷($P_2O_5\ 0.2\ g/kg$, P_1)和低磷(不施磷, P_0)各两个水平, 共组成 12 个处理($W_1N_0P_0$ 、 $W_2N_0P_0$ 、 $W_3N_0P_0$ 、 $W_1N_0P_1$ 、 $W_2N_0P_1$ 、 $W_3N_0P_1$ 、 $W_1N_1P_0$ 、 $W_2N_1P_0$ 、 $W_3N_1P_0$ 、 $W_1N_1P_1$ 、 $W_2N_1P_1$ 、 $W_3N_1P_1$), 每个处理重复 10 次。于博落回生长中期(7 月 6 日)取 5 次重复, 测定植株株高、茎粗、地上生物量、总根长、总根重以及根系吸收面积、根活力、根系超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)含量, 并测定根际土壤酶活性和微生物数量; 其余 5 次重复用于收获时(11 月 2 日)时测定生物产量。【结果】干旱胁迫及低磷、低氮胁迫对博落回的生长指标、生理指标及根际微生物数量与酶活性均有明显的抑制作用。溃坝覆盖后形成的生土施用氮(尿素)、磷肥(过磷酸钙)或灌水, 均可不同程度地增加博落回的株高、茎粗、地上生物量、根重、总根长、根系总吸收面积及活性吸收面积, 提高其 SOD 和 POD 活性并降低 MDA 含量。单施氮的效果不如单施磷肥; 缺水条件下的施肥效果小于供水处理; 供水、施氮及施磷三者之间具有明显的加合效应。磷是襄汾“9.8”溃坝区生土地上博落回生物量形成的第一限制因素。博落回根际土壤微生物数量及土壤酶活性与其根系的活性及生长状况呈显著正相关关系, 表明发达的根系促进了根际微生物群落的繁殖, 从而提高了根际土壤脲酶和磷酸酶的活性。这一结果最终可促进博落回“根土系统”向熟化方向发展。【结论】博落回能较好地适应当地的环境条件, 其抗旱耐瘠, 且具有一定的药用价值, 故可作为襄汾“9.8”溃坝区的重要备选栽培植物。

关键词: 生土; 博落回; 旱薄胁迫; 施肥; 根系; 生物学响应

中图分类号: S567.2.01; Q945.79

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2015)05-1320-08

Biological response of pioneer plant *Macleaya cordata* to N and P stresses under different water conditions

WANG Hui, SUN Tai-sen*

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: 【Objectives】On September 8, 2008, a catastrophic dam failure accident occurred in the tailing pond of the Xinta Mining Ltd. Co. Xiangfen County, Shanxi Province, China. Residual tailings from the 9.8 Xiangfen tailings dam failure covered the land and mixed with surface soil, and formed immature soil. With the immature soil as culture medium, a pot experiment was conducted to investigate effect of nitrogen (N) and phosphorous (P) applications on growth and physiological indicators of *Macleaya cordata* as well as associated soil enzyme activities and rhizosphere microbial quantity under different water conditions, aiming to provide a reference for screening and

收稿日期: 2014-11-14

接受日期: 2015-02-05

网络出版日期: 2015-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(30871483)资助。

作者简介: 王慧(1980—), 女, 山西运城人, 博士研究生, 主要从事土壤规划及土壤修复方面的研究。E-mail: hwang328@126.com

* 通信作者 E-mail: tssunsx@126.com

management of local alternative cultivated plants in the disaster area of the “9.8” Xiangfen tailings dam failure. **【Methods】** The experiment was conducted in the Experimental Farm of Shanxi Agricultural University from March to December, 2013. N and P fertilizer was applied at two levels: intermediate N ($N_0.2$ g/kg, N_1) and low N (N_0 g/kg, N_0); and intermediate P (P_2O_5 0.2 g/kg, P_1) and low P (P_2O_5 0 g/kg, P_0). Water conditions were set at three levels: low water (35%–40% of field capacity, W_1), intermediate water (45%–50% of field capacity, W_2), and high water (75%–80% of field capacity W_3). Totally 12 treatments were included: $W_1N_0P_0$, $W_2N_0P_0$, $W_3N_0P_0$, $W_1N_0P_1$, $W_2N_0P_1$, $W_3N_0P_1$, $W_1N_1P_0$, $W_2N_1P_0$, $W_3N_1P_0$, $W_1N_1P_1$, $W_2N_1P_1$, $W_3N_1P_1$, and each treatment was repeated 10 times. At the middle growth stage of *M. cordata* (July 6), five replicates were used for determining plant height, stem diameter, aboveground biomass, total root length, root weight, root absorption area, root vigor, root superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activities, and malondialdehyde (MDA) content, as well as rhizosphere soil enzyme activities and microbial biomass. The other 5 replicates were used for determining the biological yield of *M. cordata* after the harvest (November 2). **【Results】** Drought and low N/P stresses have significant inhibitory effects on the growth and physiological indicators of *M. cordata*, as well as rhizosphere microbial quantity and soil enzyme activities. However, *M. cordata* still yields a certain amount of biomass and exhibits a stronger stress resistance, while other experimental crops fail to yield. The fertilization of P (calcium superphosphate) and N (urea) or irrigation of the immature soil covered by residual tailings increases the plant height, stem diameter, aboveground biomass, root weight, total root length, total and active root absorbing areas of *M. cordata* at varying degrees. Additionally, the root SOD and POD activities are enhanced, while the MDA content is decreased by the fertilization or irrigation. The effect of fertilization alone on *M. cordata* growth is: $P > N$, the effect of fertilization + irrigation is better than that of fertilization alone, and there are significant synergic effects among the irrigation, N fertilization and P fertilization. P was the primary limiting factor for biomass formation of *M. cordata* grown in the immature soil. The rhizosphere microbial quantity and soil enzyme activities are significantly positively correlated with the root vigor and growth conditions of *M. cordata*. Well-developed root system promotes the propagation of rhizosphere microorganisms, and thus enhances associated soil urease and phosphatase activities. This mechanism ultimately promotes the development of *M. cordata* towards maturation. **【Conclusions】** Owing to its drought and barren resistance, *M. cordata* can adapt to local environmental conditions in the disaster area of the “9.8” Xiangfen tailings dam failure. Taking into consideration its medicinal value, *M. cordata* can serve as an important alternative cultivated plant in the study area.

Key words: immature soil; *Macleaya cordata*; drought-barren stress; fertilization; root system; biological response

众所周知,不论是从改造环境使其适应作物以实现低产变高产,还是从选择抑或改造作物使其适应于环境而实现作物的高产与高效,都需要认真研究和了解作物生长过程与外界环境之间的关系。针对我国北方土石山区生态环境严酷,自然灾害频繁,特别是在矿区复垦或平田整地、起高垫低的小流域治理后新形成的生土上,干旱、瘠薄已成为对生态恢复及农业生产最主要威胁的特点,选择适合当地气候条件的先锋植物并深入探讨这些植物对干旱、瘠薄的适应性,无疑对于该区的生态恢复及作物区域布局具有十分重要的现实意义^[1]。

2008年9月8日,山西省襄汾县新塔矿业公司尾矿库发生特大溃坝事故,泄容量达26.8万立方米,大量的磁铁矿尾矿覆盖在了下游的农田之上,除

了可能给土壤带来大量的Fe、Cu等金属的污染之外,在救灾过程中因为使用大型机械翻动而在原有土壤表层形成了由溃坝物与土壤混合而成的生土层,因其养分含量低且理化性质恶化,严重影响了农作物的生长,甚至绝收,已不适合种植原有的小麦、玉米等作物。因此,筛选适宜的先锋植物并研究其生理生态适应性与管理措施,对当地农业生产具有重要的理论与现实意义。

博落回 [*Macleaya cordata* (Willd.) R. Br.] 为晋南山区常见的罂粟科博落回属多年生草本植物^[2],也可人工栽培^[3]。因其具有较强的生态适应性,不仅抗旱、耐瘠、萌生小苗能力强,能快速提高植被覆盖度,而且含有多种生物碱,有较高的药用价值^[4],是矿区复垦及生土治理的理想先锋植物之

一。前人关于生土条件下植物生长的研究主要集中在豆科作物^[5]、禾本科作物^[6-7]和块根作物上^[8],而关于药用植物博落回的研究主要集中在生物学特性与生态价值^[4,9]、生物碱分离提取及药理研究等方面^[10-13],且多为对南方地区自然生长条件下博落回的研究,关于其栽培管理的研究尚不多见,尤其是针对北方旱、薄逆境条件下博落回生理生态方面的研究更少。为此,本研究以襄汾溃坝覆盖后的表层生土为栽培基质,研究不同水分条件下博落回对氮、磷肥的生物学响应,旨在为当地农业生产及生态恢复提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验于2013年3月至12月在山西农业大学校农场内进行。以20×30 cm(φ×h)聚乙烯塑料桶为试验用盆进行盆栽试验,每盆装土14 kg,供试土壤取自襄汾溃坝覆盖后的尾矿与表土的混合物,其养分含量为有机质4.7 g/kg、全氮0.24 g/kg、速效磷3.2 mg/kg、速效钾98.8 mg/kg、阳离子交换量23.6 cmol/kg, pH为7.49。供试博落回幼苗为中条山山区自然生长的博落回根蘖苗,于4月16日从野外选取生长一致的根蘖苗,挖回栽入盆中,浇水,幼苗成活后进行试验。

1.2 试验设计

根据对供试土壤理化性质的测定,试验设3个水分条件:低水,田间持水量的35%~40%(W₁);中水,田间持水量的45%~50%(W₂);高水,田间持水量的75%~80%以上(W₃)。在此基础上设中氮(N 0.2 g/kg, N₁)、低氮(不施氮 N₀)、中磷(P₂O₅ 0.2 g/kg, P₁)、低磷(不施磷, P₀)各两个水平,共12个处理,为W₁N₀P₀、W₂N₀P₀、W₃N₀P₀、W₁N₀P₁、W₂N₀P₁、W₃N₀P₁、W₁N₁P₀、W₂N₁P₀、W₃N₁P₀、W₁N₁P₁、W₂N₁P₁、W₃N₁P₁。每处理重复10次,完全随机排列。氮肥用尿素(含N 46%),磷肥用过磷酸钙(含P₂O₅ 17%)。供试肥料全部作底肥于装盆时一起施入,4月16日移栽,5月6日开始控水,7月6日取5次重复,调查测定相关生理指标,另外5次重复用于11月2日收获时测定生物产量。

1.3 测定项目与方法

生理指标的测定于7月6日进行,形态指标及产量测定于11月2日收获时进行。叶片丙二醛(MDA)含量、过氧化物酶(POD)活性及超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定分别采用硫代巴比妥酸

法、愈创木酚比色法和核黄素法^[14];根系总吸收面积与活性吸收面积的测定采用次甲基蓝吸附法^[15];根系活力的测定采用TTC法^[15];根长的测定采用根系扫描仪扫描法;土壤微生物数量的测定采用稀释平板法;土壤脲酶及磷酸酶活性的测定分别采用靛酚比色法和苯磷酸钠比色法^[16]。

2 结果与分析

2.1 不同处理对博落回植株生长的影响

表1结果表明,干旱胁迫及缺氮和缺磷胁迫均导致博落回地上部生长明显受阻,在不同供水条件下施用氮、磷肥均可显著促进博落回地上部的生长。水、氮、磷三因素之间均表现出了明显的正交互作用。由表1结果还可以看出,氮、磷对不同供水条件下博落回地上部生长的促进作用有所不同,在低水(W₁)、中水(W₂)、高水(W₃)条件下单施磷和单施氮分别使博落回的株高比不施肥(NOP₀)处理增加了21.68%、11.72%、13.11%和6.33%、17.14%、4.38%;茎粗分别增加了29.87%、18.18%、8.18%和6.36%、22.76%、8.13%;地上生物量分别增加了17.49%、8.28%、15.66%和3.98%、23.68%、6.47%。在低水(W₁)、中水(W₂)、高水(W₃)条件下,氮磷配施分别比单施磷和单施氮博落回的株高增加了19.74%、30.42%、18.75%和26.32%、6.6%、19.63%;茎粗增加了22%、34.1%、31.93%和34.19%、15.23%、30.83%;地上生物量增加了21.44%、31.76%、19.52%和29.22%、11.25%、29.23%。表明单施磷对博落回地上部生长的促进作用高于单施氮肥,在单施氮的基础上施磷的效果优于在单施磷的基础上施氮。这可能与磷素营养更有利于促进根系的生长有关,施磷促进了根系的生长,而庞大的根系又提高了对水分和其他营养元素的吸收,并最终促进了作物的生长,但也可能与栽培基质中养分的含量有关。另外,值得说明的是,本试验低水、低肥条件下其他作物(玉米、大豆等)已无法生长,但博落回仍获得了一定的生物产量,表现出了其对干旱与瘠薄逆境的强大适应性。

2.2 不同处理对博落回根系生长的影响

根系是作物吸收水分和养分的重要器官,生产中遇到的主要自然灾害胁迫,如旱、涝、盐碱、贫瘠等引起各种生理障碍其原初伤害器官首先是根系。由此可见,研究旱、薄胁迫对根系的影响,可以更好地反映植物的生长状况。由表1结果可以看出,博

表 1 不同处理对博落回生长指标的影响
Table 1 Effect of different treatments on growth indexes of *Macleaya cordata*

处理 Treatment	株高 (cm) Height	茎粗 (cm) Stem diameter	地上生物量 (g) Shoot weight	总根长 (cm) Total root length	根重 (g) Root weight
W ₁ N ₀ P ₀	102.40 ± 6.88 i	0.77 ± 0.05 h	414.26 ± 15.76 k	2219.40 ± 25.63 g	80.90 ± 2.15 i
W ₂ N ₀ P ₀	135.80 ± 4.55 f	1.10 ± 0.05 e	555.58 ± 11.80 h	2373.20 ± 38.15 f	110.60 ± 2.29 f
W ₃ N ₀ P ₀	155.20 ± 4.82 d	1.23 ± 0.04 d	612.12 ± 5.75 e	2603.60 ± 47.05 e	117.26 ± 5.87 e
W ₁ N ₀ P ₁	124.60 ± 5.13 g	1.00 ± 0.09 f	486.70 ± 13.85 i	2638.20 ± 76.38 e	97.44 ± 1.45 g
W ₂ N ₀ P ₁	153.60 ± 5.64 d	1.19 ± 0.05 d	624.58 ± 6.52 d	2809.40 ± 95.43 d	123.88 ± 4.18 d
W ₃ N ₀ P ₁	181.80 ± 5.12 b	1.51 ± 0.08 b	757.08 ± 15.34 b	3037.20 ± 73.10 bc	148.98 ± 2.58 b
W ₁ N ₁ P ₀	114.40 ± 4.51 h	0.91 ± 0.03 g	448.56 ± 6.17 j	2257.60 ± 78.15 g	93.40 ± 0.80 h
W ₂ N ₁ P ₀	144.40 ± 5.32 e	1.17 ± 0.05 de	577.68 ± 5.65 g	2634.60 ± 67.23 e	110.22 ± 3.50 f
W ₃ N ₁ P ₀	162.00 ± 6.86 c	1.33 ± 0.03 c	651.72 ± 5.84 c	2736.20 ± 59.48 d	126.52 ± 1.36 d
W ₁ N ₁ P ₁	149.20 ± 3.70 de	1.22 ± 0.02 d	591.04 ± 8.25 f	2978.40 ± 88.29 c	117.78 ± 1.29 e
W ₂ N ₁ P ₁	182.40 ± 4.28 b	1.57 ± 0.05 b	746.50 ± 8.00 b	3112.40 ± 56.54 ab	139.80 ± 3.04 c
W ₃ N ₁ P ₁	193.80 ± 6.14 a	1.74 ± 0.05 a	842.22 ± 5.27 a	3129.20 ± 42.95 a	158.72 ± 3.17 a

注 (Note): 同一列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at the 5% level.

落回根部状况与地上一致,干旱胁迫、缺氮和缺磷胁迫均影响了博落回根部的生长,在不同供水条件下施用氮、磷肥,或在不同施磷与施氮水平下增加供水,均可显著促进博落回根部的生长。水、氮、磷三因素之间也表现出了明显的正交互作用。氮、磷对不同供水条件下博落回根系生长的促进作用大小也有所不同,在低水(W₁)、中水(W₂)、高水(W₃)条件下单施磷和单施氮分别使博落回的根长增加了 18.87%、18.38%、16.65% 和 1.72%、11.01%、5.09%;根重增加了 20.44%、12.01%、27.05% 和 15.45%、-0.34%、7.9%。在低水(W₁)、中水(W₂)、高水(W₃)条件下,氮磷配施分别比单施磷和单施氮博落回的根长增加了 12.9%、10.79%、3.03% 和 31.93%、18.14%、14.36%;根重增加了 20.87%、12.85%、6.54% 和 26.1%、26.84%、25.45%。统计分析结果表明,除在中水条件下单施氮处理根重与不施氮处理间差异未达显著水平之外,其余均达差异显著水平,说明在本试验条件下施磷对博落回根系生长的促进作用也优于施氮。

2.3 不同处理对博落回生理指标的影响

2.3.1 不同处理对博落回根系吸收面积及根系活力的影响 根系吸收总面积可以反映根系吸收能力的大小,而根系活跃吸收面积则能在一定程度上反映根系活力状况。表 2 结果表明,无论施肥与否,增加

供水量均可提高博落回根系的吸收面积及根系活力;在不同供水条件下单施磷、单施氮或氮磷配施均可显著提高博落回根系的总吸收面积、活性吸收面积及根系活力,但不同的施肥处理对根系吸收面积及根活力的增加幅度不同,无论高水、中水,还是低水处理均表现为氮磷配施的效果最好,而单施磷的效果又好于单施氮,这可能是在本试验条件下施磷对博落回生物量增加的效果好于施氮的原因所在。施磷更好地促进了根系的生长,进而也增加了吸收其它营养元素及水分的能力,并最终促进了植物的整体生长。将表 2 中根系不同生理指标间进行相关分析可知,不同处理条件下根系的总吸收面积及活性吸收面积与根系活力间均表现为极显著的正相关关系($r=0.89$, $n=60$; $r=0.86$, $n=60$),表明在试验过程中只要测定其中一项,就可以较好地反映根系的活力。

2.3.2 不同处理对博落回超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性及丙二醛(MDA)含量的影响 大量研究表明,SOD 和 POD 均为细胞脂膜过氧化作用中的关键酶,可以解除或减轻逆境胁迫中膜脂过氧化作用对细胞膜的损伤。而作为植物细胞脂膜过氧化的重要产物,MDA 含量增加的数量,可以看作是逆境条件下作物受害程度的重要指标。从表 2 可以看出,不同施肥条件下增加灌水量及不同供水条件下增施肥料,均可提高博落回叶片 SOD 及 POD

表 2 不同处理对博落回生理指标的影响

Table 2 Effect of different treatments on physiological indexes of *Macleaya cordata*

处理 Treatment	根系总吸收面积 Total uptake area (m ² /plant)	活性吸收面积 Active uptake area (m ² /plant)	根活力 Root activity (μg/g)	超氧化物歧化酶 SOD activity [U/(g·h)]	过氧化物酶 POD activity [U/(g·min)]	丙二醛 MDA content (nmol/g)
W ₁ N ₀ P ₀	15.12 ± 0.34 g	10.82 ± 0.33 f	86.06 ± 1.00 h	716.90 ± 18.27 i	96.50 ± 2.98 f	137.40 ± 6.74 a
W ₂ N ₀ P ₀	15.74 ± 0.54 f	12.48 ± 0.48 e	94.10 ± 1.12 g	744.40 ± 15.61 h	100.68 ± 3.28 ef	123.52 ± 8.50 b
W ₃ N ₀ P ₀	16.80 ± 0.58 e	13.08 ± 0.28 d	97.30 ± 0.75 fg	759.98 ± 10.06 gh	106.24 ± 5.63 cde	116.12 ± 6.76 bcd
W ₁ N ₀ P ₁	17.12 ± 0.43 de	13.98 ± 0.26 c	100.76 ± 2.36 ef	769.44 ± 10.32 fg	100.06 ± 3.48 ef	119.94 ± 5.38 bc
W ₂ N ₀ P ₁	18.18 ± 0.44 c	14.12 ± 0.19 c	114.54 ± 4.00 c	800.88 ± 12.39 e	107.66 ± 4.70 cd	110.82 ± 5.55 def
W ₃ N ₀ P ₁	18.76 ± 0.30 ab	14.90 ± 0.25 b	120.22 ± 2.45 b	827.46 ± 10.19 d	117.52 ± 5.06 b	102.52 ± 5.83 fg
W ₁ N ₁ P ₀	16.78 ± 0.24 e	13.02 ± 0.22 d	101.70 ± 3.38 e	755.44 ± 11.33 gh	96.88 ± 6.21 f	122.94 ± 8.60 b
W ₂ N ₁ P ₀	17.50 ± 0.47 d	13.24 ± 0.27 d	106.92 ± 3.43 d	778.70 ± 13.70 f	102.90 ± 5.86 def	113.02 ± 5.11 cde
W ₃ N ₁ P ₀	17.54 ± 0.49 d	13.30 ± 0.29 d	111.62 ± 3.63 c	801.74 ± 11.90 e	110.84 ± 6.00 c	102.50 ± 4.82 fg
W ₁ N ₁ P ₁	18.16 ± 0.30 c	13.16 ± 0.36 d	113.74 ± 4.16 c	879.16 ± 14.86 c	106.28 ± 5.27 cde	106.58 ± 4.65 ef
W ₂ N ₁ P ₁	18.24 ± 0.38 bc	14.88 ± 0.25 b	119.20 ± 1.75 b	914.40 ± 11.19 b	123.80 ± 5.13 a	97.92 ± 6.38 g
W ₃ N ₁ P ₁	19.04 ± 0.48 a	16.10 ± 0.29 a	125.52 ± 3.06 a	953.76 ± 11.49 a	129.86 ± 6.17 a	88.84 ± 8.58 h

注 (Note): SOD—Superoxide dismutase; POD—Peroxidase; MDA—Malondialdehyde. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平
Values followed by different letters in the same column are significant at the 5% level.

活性,降低 MDA 含量,减轻逆境对博落回的伤害。比较不同水分条件下不同施肥处理对两种酶活性及 MDA 含量的影响可以看出,在相同水分条件下,单施磷提高酶活性的效果好于施氮,而氮磷配施的效果最佳。比较不同处理下 SOD 及 POD 活性的变化情况还可以发现,SOD 活性的变化幅度大于 POD,表明博落回 SOD 活性对逆境胁迫的敏感性更强。

2.4 不同处理对博落回根际微生物及土壤酶活性的影响

众多的研究结果表明,土壤中微生物的数量和酶活性可以在一定程度上反映土壤的肥沃度。为了探明生土条件下种植博落回对土壤的培肥效果及有机生命化程度,在博落回生长中期对其根际土壤脲酶、磷酸酶活性及微生物三大类群进行了测定。表 3 结果表明,不同施肥处理的博落回根际土壤中的脲酶、磷酸酶活性及微生物三大类群均随着水分含量的升高而升高,说明水分对其影响在本试验条件下起着关键的作用。在同一水分条件下,不同施肥处理对土壤脲酶活性的影响表现为以中氮中磷(N₁P₁)处理最高,中氮无磷(N₁P₀)次之,然后是无氮中磷(N₀P₁),不施肥(N₀P₀)最低,表明无论施氮还是施磷,均有利于提高土壤脲酶活性,但施氮的效果优于施磷,氮磷配合效果最好;不同施肥处理对土壤磷酸酶活性的影响也表现为以 N₁P₁ 处理最高,

N₀P₁ 处理次之,N₁P₀, N₀P₀ 处理最低,表明施氮和施磷均有利于提高土壤磷酸酶活性,但施磷的效果好于施氮。在同一水分条件下,不同施肥处理对根际土壤中细菌数量的影响与对土壤磷酸酶活性的影响变化趋势一致,对根际真菌数量的影响与对土壤脲酶活性的影响一致,但对根际土壤中放线菌数量的影响则表现为在不同水分条件下有所不同,表现出了事物的复杂性。由表 3 和图 1 还可以看出,不同施肥处理对三大微生物数量及土壤酶活性的影响,表现出与博落回根系生长对水肥反应的基本一致性,根系越发达、根系活性越高,则根际土壤酶活性越高,微生物的数量也就越多。

3 讨论与结论

土壤缺肥、缺水一直是限制我国北方旱地农田生产力的最主要因素,供水、供肥不足,特别是水肥不协调是造成这一地区长期产量不高的主要原因^[17]。有关作物水肥耦合及氮、磷肥肥效方面的研究,国内外已有众多的报道,由于受供试土壤基础肥力差异的影响,所得结果不尽相同,但多数研究者认为氮为首要因素,特别是在产量水平低与土壤肥力差的条件下,氮是形成作物产量的第一要素,而施磷是在有一定氮的基础上追求进一步高产的必需^[18-20]。本试验选用了氮、磷营养元素背景值均极

表 3 不同处理博落回根际土壤酶活性及微生物数量

Table 3 Soil enzyme activities and microbe quantity in *Macleaya cordata* rhizosphere under different treatments

处理 Treatment	细菌 Bacteria ($\times 10^6$ cfu/g)	真菌数 Fungi ($\times 10^3$ cfu/g)	放线菌 Actinomycetes ($\times 10^5$ cfu/g)	脲酶活性 Urease activity ($\text{NH}_4\text{-N mg/g}$)	磷酸酶活性 Phosphatase activity (phenol mg/kg)
W ₁ N ₀ P ₀	2.29 ± 0.18 i	3.43 ± 0.12 h	3.79 ± 0.21 f	22.24 ± 1.12 g	24.80 ± 1.16 g
W ₂ N ₀ P ₀	2.66 ± 0.07 h	3.73 ± 0.21 g	5.08 ± 0.25 e	24.68 ± 0.95 f	27.30 ± 0.73 f
W ₃ N ₀ P ₀	2.97 ± 0.27 fg	4.02 ± 0.11 ef	6.14 ± 0.23 d	28.00 ± 0.98 e	30.06 ± 0.87 e
W ₁ N ₀ P ₁	3.21 ± 0.11 ef	3.61 ± 0.18 gh	4.84 ± 0.29 e	24.12 ± 0.86 f	36.52 ± 1.24 c
W ₂ N ₀ P ₁	3.52 ± 0.16 cd	4.20 ± 0.09 de	6.81 ± 0.45 c	28.30 ± 0.77 e	39.90 ± 2.02 b
W ₃ N ₀ P ₁	3.97 ± 0.20 b	4.22 ± 0.11 de	7.76 ± 0.35 b	33.74 ± 1.13 d	43.38 ± 1.24 a
W ₁ N ₁ P ₀	2.88 ± 0.09 gh	3.84 ± 0.14 fg	4.99 ± 0.13 e	34.42 ± 1.41 d	29.82 ± 1.63 e
W ₂ N ₁ P ₀	3.05 ± 0.14 fg	4.24 ± 0.19 de	5.91 ± 0.23 d	41.46 ± 1.42 c	31.50 ± 1.43 e
W ₃ N ₁ P ₀	3.70 ± 0.23 c	4.40 ± 0.16 cd	6.81 ± 0.27 c	46.98 ± 1.93 b	34.56 ± 1.28 d
W ₁ N ₁ P ₁	3.41 ± 0.16 de	4.62 ± 0.24 c	6.21 ± 0.09 d	40.16 ± 1.82 c	37.98 ± 1.10 c
W ₂ N ₁ P ₁	4.14 ± 0.15 b	5.57 ± 0.16 b	7.97 ± 0.21 b	45.62 ± 2.30 b	43.70 ± 1.70 a
W ₃ N ₁ P ₁	4.54 ± 0.28 a	6.68 ± 0.41 a	8.76 ± 0.17 a	48.90 ± 1.56 a	44.58 ± 1.01 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at the 5% level.

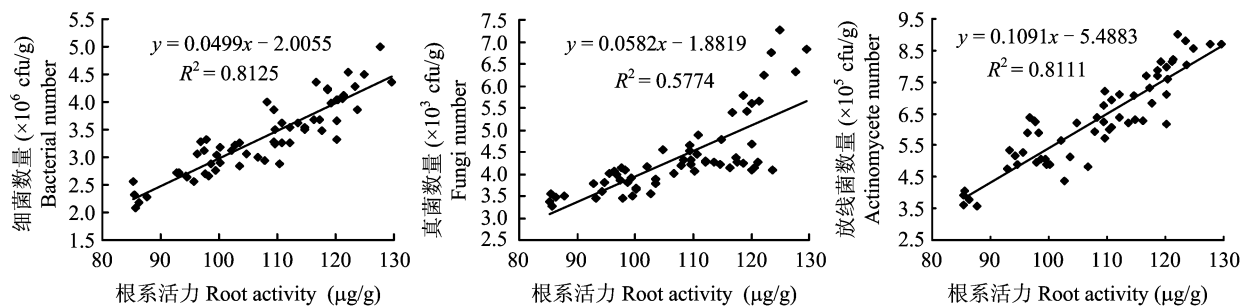


图 1 根系活力与根际微生物数量相关性

Fig. 1 Correlations between root activity and microbe quantity of rhizosphere

低的尾矿与表土的混合物为供试土壤,研究了不同水分条件下氮、磷及其配合对博落回生长及生理状况的影响,结果表明,氮、磷均有一定的增产效果,且磷的作用优于氮,磷才是该土壤肥力形成与植物生长的启动元素,这可能与磷对植物根系生长的促进作用高于氮素营养有关,因此,在资金有限的情况下,应优先施用磷肥,这也与张平等^[6]在黄土母质性生土上所得的结论类似。

前人的研究表明,施肥可以降低土壤无效水分的消耗,提高作物产量与水分利用率,但在干旱的年份收效很小^[21],本试验结果则表明,重度干旱(低水)条件下施用氮、磷肥的增产幅度(42.67%)高于中度干旱(中水)条件(34.36%)和正常(高

水)条件(37.59%)。这可能与博落回具有更强的抗旱性以及试验所设低水处理中的含水量不同有关。有研究表明,在干旱条件下,施肥量与氮、磷配比均有可能影响作物的产量^[17,22],由于试验规模所限,本试验没有开展相关方面的研究,下一步我们将继续就不同氮、磷用量及氮磷配比等方面进行研究。

逆境胁迫可使植物体内活性氧的产生与消除平衡失调,造成植物体内大量的自由基累积,进而启动膜脂过氧化,导致膜结构的损伤和破坏,对植物产生伤害^[23]。本试验结果表明,干旱及缺肥胁迫均可导致博落回地上部抗氧化酶 SOD 和 POD 活性有所下降,过氧化产物 MDA 明显增加,表明抗氧化酶系统

已难以有效清除因胁迫而产生的过氧化产物,植株已受到较大的损伤。在干旱条件下施肥(磷、氮)以及在缺肥条件下灌水,均可以提高博落回 SOD 和 POD 活性,降低 MDA 含量,且肥水之间表现出明显的正加合效应,这与博落回的生长状况表现一致,表明以上 3 种指标能够客观地反映博落回的抗逆能力。

前人的研究表明,博落回的耐瘠性和耐旱性均很强^[4],本试验结果证明,在土壤肥力极低且有干旱胁迫的条件下,其他作物(玉米、大豆等)已很难生存,博落回仍能获得一定的产量,这可能与其据有较大的总根长,较高的根系活力与活性吸收面积有关。但要想获取较高的产量,适当的浇水、施肥,尤其是磷氮配施均是必需的。博落回非常适合当地的气候条件,在襄汾溃坝物覆盖区生土上种植博落回,如能保证一定量的磷、氮肥施用及正常的灌水,完全可以获得较高的产量和经济效益。

施用氮、磷肥,尤其是在一定灌水量的前提下施用氮磷肥,不仅有利于促进博落回根系与地上部的生长,而且能明显增加博落回根际土壤脲酶和磷酸酶的活性及微生物的数量。博落回根际土壤微生物数量与根系活力之间存在着显著的正相关关系。有研究表明,土壤微生物数量及酶活性的增加有利于进一步活化土壤中的养分^[16,24],因而可以促进生土熟化和作物的生长,使其形成一个良性的土壤生态循环系统。

参考文献:

- [1] 山仑. 植物抗旱生理研究与发展半旱地农业[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 1-5.
Shan L. Plant drought resistance and semi-dry land farming[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(1): 1-5.
- [2] 郭永强,张永清,刘涛. 先锋植物小果博落回对土壤理化性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(30): 18579-18581, 18584.
Guo Y Q, Zhang Y Q, Liu T. Effect of pioneer plant *Macleaya microcarpa* on the physicochemical properties of soil[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2011, 39(30): 18579-18581, 18584.
- [3] 孙伟,陈卫,王雅辉. 博落回的栽培[J]. 特种经济动植物, 2006, (4): 25.
Sun W, Chen W, Wang Y H. Cultivation of *Macleaya cordata* [J]. Special Economic Plant and Animal, 2006, (4): 25.
- [4] 邹序安,龙正权. 博落回的生物学特性与生态价值[J]. 福建林业科技, 2009, 36(3): 244-247.
Zou X A, Long Z Q. The biological characteristics and the ecological value of *Macleaya cordata* [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2009, 36(3): 244-247.
- [5] 杜天庆,苗果园,郝建平,等. 不同类型豆科植物对黄土母质生土的改土效果[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 76-86.
Du T Q, Miao G Y, Hao J P *et al.* Soil improvement effect by planting different types of legume plant in immature loess subsoil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 76-86.
- [6] 张平平,苗果园. 生土条件下冬小麦对氮、磷、钾的原始响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 156-161.
Zhang P P, Miao G Y. Triggering response of winter wheat to nitrogen, phosphorus and potassium nutrition in raw soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(2): 156-161.
- [7] 王璐,张永清,李鹏,等. 不同黍稷品种对生土栽培的生物学响应[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 728-730.
Wang L, Zhang Y Q, Li P *et al.* Biological response of different broomcorn millet cultivars to immature soil [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 728-730.
- [8] 高菊生,黄晶,徐明岗,等. 湖南 3 种典型红壤生土长期施肥对块根作物产量影响[J]. 中国农学通报, 2012, (2): 31-34, 53.
Gao J S, Huang J, Xu M G *et al.* Influence of long term fertilizer application on output of root crops (sweet potato) in three kinds of typical parent material soils in South Hunan [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, (2): 31-34, 53.
- [9] 石慧珍,刘明霞,许静,等. 青藏高原高寒草甸罂粟科植物种子萌发特性研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(9): 1880-1884.
Shi H Z, Liu M X, Xu J *et al.* The germination characteristics of papaveraceae species in the alpine meadow on the Qinghai Tibetan Plateau [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2008, 28(9): 1880-1884.
- [10] 杨新娟,苗芳,郑峰,等. 小果博落回的生物碱分离与鉴定[J]. 西北植物学报, 2010, 30(2): 405-411.
Yang X J, Miao F, Zheng F *et al.* Isolation and identification of alkaloids from *macleaya microcarpa* (Maxim.) fedde [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(2): 405-411.
- [11] 刘拉平,潘萌,周乐. 小果博落回中 5 种生物碱的提取与分离[J]. 西北农业学报, 2013, 22(5): 140-143.
Liu L P, Pan M, Zhou L. Extraction and isolation of five kinds of alkaloids from *macleaya microcarpa* [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(5): 140-143.
- [12] 冯岗,张静,李修伟,等. 小果博落回生物碱对几种农业害虫的生物活性[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2008, 37(2): 187-192.
Feng G, Zhang J, Li X W *et al.* Insecticidal activity of alkaloids from *Macleaya microcarpa* against several species of insect pests [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science), 2008, 34(2): 187-192.
- [13] 郁建平,赵东亮,孟祥斌,等. 博落回生物碱对 8 种真菌的抑菌作用[J]. 山地农业生物学报, 2006, 25(1): 89-91.
Yu J P, Zhao D L, Meng X B *et al.* The antibacterial effect of the alkaloids from *Macleaya cordata* on eight kinds of fungi [J].

- Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2006, 25(1): 89-91.
- [14] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Wang X K. Plant physiological and biochemical experiment principle and technology [M]. Beijing: High Education Press, 2006.
- [15] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- Zhang Z L, Qu W Q. Guidance of plant physiological experiments[M]. Beijing: High Education Press, 2003.
- [16] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- Li Z G, Luo Y M, Teng Y. Soil and environmental microbiology research method[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [17] 张淑香, 金柯, 蔡典雄, 等. 水分胁迫条件下不同氮磷组合对小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 276-279.
- Zhang S X, Jin K, Cai D X *et al.* Effect of different level of N and P on the yield of winter wheat under water stress[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(3): 276-279.
- [18] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 406-410.
- Sun R L, Zhao B Q, Zhu L S *et al.* Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting and controlling soil fertility [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(4): 406-410.
- [19] 朱洪勋, 张翔, 孙春河. 不同施肥结构的增产效应和对小麦籽粒品质的影响[J]. 华北农学报, 1995, 10(2): 100-105.
- Zhu H X, Zhang X, Sun C H. Effect of different fertilizer structure on the yield of wheat and maize and the quality of wheat [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1995, 10(2): 100-105.
- [20] 裴雪霞, 张定一, 王姣爱, 等. 氮、磷对优质强筋小麦产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 48-50.
- Pei X X, Zhang D Y, Wang J A *et al.* Effect of N and P fertilizer on the product and quality of high quality and gluten wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(3): 48-50.
- [21] 戴庆林, 杨文耀. 阴山丘陵农区水肥效应与耦合模式的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1995, 13(1): 20-24.
- Dai Q L, Yang W Y. Water-fertilizer effects and their coupling reaction model in Yinshan Hilly rainfed agricultural region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1995, 13(1): 20-24.
- [22] 陈磊, 郝明德, 戚龙海. 长期施肥对黄土旱塬区土壤-植物系统中氮、磷养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1006-1012.
- Chen L, Hao M D, Qi L H. Effects of long-term fertilization on nutrient variety of soil and plant systems in dry-land of Loess Plateau[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 1006-1012.
- [23] 张永清, 苗果园, 张定一. 污灌胁迫对春小麦抗氧化酶活性及根系与幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4): 662-665.
- Zhang Y Q, Miao G Y, Zhang D Y. Effect of stress from sewage irrigation on antioxidant enzymes activity and root and seedling growth of spring wheat [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(4): 662-665.
- [24] 王鑫, 徐秋明, 曹兵, 等. 包膜控释尿素对保护地菜地土壤肥力及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 77-80.
- Wang X, Xu Q M, Cao B *et al.* Effects of controlled release coated urea on soil fertility and enzyme activities of protected vegetable field [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 77-80.