

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0584

王世琪, 刘金彪, 康继月, 安勤勤, 王智, 徐炳成. 水分和磷处理对建植当年柳枝稷根系生长和形态特征的影响. 草业科学, 2019, 36(8): 2096-2104.

WANG S Q, LIU J B, KANG J Y, AN Q Q, WANG Z, XU B C. Effects of water and phosphorus on root growth and morphological characteristics of switchgrass in the establishment year. Pratacultural Science, 2019, 36(8): 2096-2104.

水分和磷处理对建植当年柳枝稷根系 生长和形态特征的影响

王世琪¹, 刘金彪¹, 康继月², 安勤勤², 王智^{1,2}, 徐炳成^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 明确柳枝稷 (*Panicum virgatum*) 根冠生长及根系形态特征与水肥供应关系, 可为旱区柳枝稷草地的水肥管理提供依据。本研究采用裂区设计, 通过盆栽试验, 以水分水平 [高水: 80% FC(田间持水量 field capacity) 和低水: 40% FC] 为主区, 施磷处理 (0、0.05 和 0.1 g P₂O₅·kg⁻¹ 干土, 以每千克干土施 P₂O₅ 的量计算) 为副区, 生育期末测定各处理下柳枝稷根冠生物量及根系形态特征。结果表明, 不论施磷与否, 高水下柳枝稷根冠生物量、总根长、根表面积和根系平均直径均显著 ($P < 0.05$) 大于低水条件, 而水分利用效率、比根长显著降低 ($P < 0.05$)。高水下施磷显著提高了根冠生物量、总根长和根表面积, 降低了柳枝稷根冠比。低水下, 施磷可显著提高柳枝稷水分利用效率, 施磷 (0.1 g·kg⁻¹) 可显著提高总根长和根表面积、促进细根 (0~0.5 mm) 生长, 表明低水条件下适当施磷有助于提高建植当柳枝稷根系吸收能力和对干旱的适应性。

关键词: 细根; 根系平均直径; 比根长; 生物量; 水分利用效率

中图分类号: S157.4⁺33

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2019)08-2096-09

Effects of water and phosphorus on root growth and morphological characteristics of switchgrass in the establishment year

WANG Shiqi¹, LIU Jinbiao¹, KANG Jiyue², AN Qinqin², WANG Zhi^{1,2}, XU Bingcheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: To clarify the relationships of water and phosphorus with root growth and morphology could provide the basis for water and fertilizer management during the grassland construction of switchgrass (*Panicum virgatum*) in dry region. A pot experiment was conducted using split-plot design, and the main plot was soil water regimes [high water: 80% FC (field capacity) and low water: 40% FC], while the subplot was phosphorus (P) treatments (0, 0.05 and 0.1 g P₂O₅ per kg dry soil). The shoot and root biomass production, and root morphology of switchgrass under different treatments were measured at the end of the growth period. Results showed that regardless of P application, switchgrass had significantly ($P < 0.05$) higher shoot and root biomass, total root length (TRL), root surface area (RSA) and root average diameter, but lower water use

收稿日期: 2018-10-23 接受日期: 2019-01-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501703)

第一作者: 王世琪 (1993-), 女, 山东东港人, 在读硕士生, 研究方向为水土保持植被。E-mail: wssq17@126.com

通信作者: 徐炳成 (1973-), 男, 安徽肥东人, 研究员, 博士, 研究方向为草地建设与植被恢复。E-mail: Bcxu@ms.iswc.ac.cn

efficiency and specific root length under high soil water regime than under low soil water regime. Under high soil water regime, P application significantly increased shoot and root biomass production, and TRL and RSA. Under low soil water regime, P application significantly increased water use efficiency of switchgrass, and 0.1 g P₂O₅ per kg dry soil application significantly promoted TRL, RSA and root growth in 0~0.5 mm diameter. All these indicated that under low soil water conditions, rational P application could improve the root absorptive capacity and drought adaptability of switchgrass in the establishment year.

Keywords: fine root; root average diameter; specific root length; biomass production; water use efficiency

Corresponding author: XU Bingcheng E-mail: Bcxu@ms.iswc.ac.cn

半干旱黄土丘陵区是国家实施退耕还林还草及生态建设的重点区域，作为植被恢复的重要组成部分，栽培草地建设一直难成规模，其原因包括干旱和土壤贫瘠，以及缺乏优良草种^[1]。柳枝稷 (*Panicum virgatum*) 为禾本科黍属多年生 C₄ 草本植物，根系发达，适应性强，具有较高的生物量和水肥利用效率，较强的耐旱和耐贫瘠能力；既可作为牧草，也是很好的生物质能源作物^[2-4]。在陕北半干旱黄土丘陵区不同立地条件下，柳枝稷表现出高生物量和抗旱能力强等特征，是一种优良的水土保持植物^[3-4]。

磷是植物体内许多有机化合物的组成成分，又以多种方式参与植物代谢过程^[5]。干旱限制了土壤中磷的迁移和有效性及植物对磷的获取，使磷成为侵蚀环境中限制植物生长的主要因素之一^[6]。干旱条件下，施磷可促进植物根冠生长，提高植物气孔调节能力，降低蒸腾耗水量，提高水分利用效率及抵御干旱胁迫的能力^[7]。根系是植物吸收土壤水分和养分的主要器官，根系生长、形态特征及生理特性的适应性变化是植物高效利用有限土壤水肥资源的基础^[8-9]。低磷条件下，植物通常通过提高根冠比、总根长和根表面积，以扩大其在土壤中的分布范围以及与土壤的接触面积，提高对磷的吸收利用^[6, 10]。当水分和磷同时亏缺时，根系通常形成“表层细根吸磷、深层根系吸水”的分布特征以提高其吸收和利用^[6]。干旱条件下，适当施磷可促进细根生长，提高根系水分吸收及传输能力^[11]。

半干旱黄土丘陵区年降水量低且土壤有效磷含量低，这将影响植物的生长与发育^[2, 12]。柳枝稷在黄土丘陵区的研究多集中于其对干旱、低温和盐胁迫的适应性，以及育种、苗期管理、种植密度和施

氮等农艺措施对柳枝稷生长的影响，而对磷供应条件下柳枝稷生长和适应性特征的研究开展较少^[13]。建植当年柳枝稷根系的良好发育是其成功越冬并建植的关键。本研究在控制条件下，通过设置两种水分供应水平和 3 个施磷处理，对比水分和磷处理对建植当年柳枝稷根冠生长与根系形态特征的影响，以期为认识柳枝稷对半干旱区的适应性及其栽培草地建植管理提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

柳枝稷品种为 Alamo，引自美国，种子于 2014 年 10 月采自陕西安塞农田生态系统国家野外观测研究站山地试验场 (36°05'60" N、109°19'23" E)，海拔 1 068 – 1 309 m。晒干后在自然状态下储藏，千粒重为 2.110 5 g，试验开始前的种子发芽试验表明其发芽率在 90% 以上。

盆栽土壤采自安塞农田耕层 (0 – 20 cm)。土壤养分含量：有机质 2.60 g·kg⁻¹、速效氮 2.80 mg·kg⁻¹、速效磷 11.67 mg·kg⁻¹、全氮 0.97 g·kg⁻¹、全磷 0.61 g·kg⁻¹，土壤田间持水量 (field capacity, FC) 为 20%。盆栽使用规格为 30 cm × 20 cm (高度 × 直径)、底部封堵的 PVC 管。装桶时桶底铺碎石子，沿桶内壁安置一根内径为 2 cm、长 25 cm 的 PVC 管作为灌水管。每桶装干土 9 kg。

1.2 试验设计

采用裂区试验设计，以两个水分水平 80% FC (高水, high water, HW) 和 40% FC (低水, low water, LW)^[14] 为主区，各主区内设置 3 个施磷处理 (以每千克干土施 P₂O₅ 的量计算；0、0.05、0.1 g·kg⁻¹，分别记为 P₀、P_{0.05}、P_{0.1})^[11] 为 3 个副区，共 6 个处理，每个处

理5个重复。磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 含量为15%),装桶时随土均匀一次混入。

于2016年4月17日开始,10月28日结束。采用种子播种,每穴约5粒种子,穴深1 cm,每盆12穴。苗期保持充足供水。第1次间苗(4月30日)每穴留两株,第2次间苗(5月20日)每穴留壮苗1株,每盆保留12株。7月20日(柳枝稷处于拔节期)开始水分控制,控水前每盆覆盖2 cm厚珍珠岩以减少土壤水分蒸发。同时,设置3桶无植株对照用于核算日土壤水分蒸发量。

土壤含水量采用称重法测定与控制,每天18:00进行称重控水和记录计算每日耗水量,水从桶内侧灌水管加入。每周调整盆栽摆放位置,及时清除杂草,并随时收集枯落物。试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点试验室外防雨棚下进行。

1.3 测定指标和方法

生物量与根冠比:参考Wang等^[15]的测定方法。2016年10月28日生育期结束时统一毁桶。将地上部分收获完毕后,所有根系在0.25 mm的孔筛中用自来水冲洗干净,用吸水纸吸干水分后,每桶随机选取两株柳枝稷根系用于形态特征测定。根系扫描后,将地上部分和全部根系分别装入纸袋,于105℃杀青30 min,80℃烘干至恒重后得到地上生物量(aboveground biomass, AGB, g)和根系生物量(root biomass, RB, g)。根冠比(root to shoot ratio, RSR)为根系生物量与地上生物量之比,即 $RSR = RB/AGB$ 。

蒸腾耗水量与水分利用效率:参考Hund等^[8]的测定方法,根据每日称重获取的总耗水量减去土壤蒸发量为当日蒸腾耗水量。蒸腾耗水量(transpiration water, T, kg)为整个试验过程中日蒸腾耗水量之和。水分利用效率(water use efficiency, WUE, $g \cdot kg^{-1}$)为总生物量与蒸腾耗水量比值,即 $WUE = (AGB + RB)/T$ 。

根系形态特征:参考Wang等^[15]和Li等^[16]的测定方法,将每桶随机选取两株柳枝稷根系平铺在透明胶片上,利用EPSON扫描仪(Perfection V700 Photo, Long Beach, CA, USA)进行扫描,然后用根系分析软件WinRHIZO(v2009, Regent Instruments, Montreal, QC, Canada)分析得到总根长(total root length, TRL, m)、根表面积(root surface area, RSA, m^2)、总

根体积(cm^3)、根系平均直径(root average diameter, RAD, mm)以及根系每0.1 mm径级的根长、根表面积和根体积。研究表明,柳枝稷根系主要为0~0.5 mm径级的一级根,占总根长的67%~83%^[17]。因此,本研究按照0.5 mm划分柳枝稷粗根与细根:细根长(fine root length, m)为0~0.5 mm径级的根长,粗根长(coarse root length, m)为>0.5 mm径级的根长。细根生物量(fine root biomass, g)为0~0.5 mm径级的根系生物量,即细根生物量=根系生物量×(细根体积/总根体积)。粗根生物量(coarse root biomass, g)为>0.5 mm径级的根系生物量,即粗根生物量=根系生物量×(粗根体积/根体积)。

比根长(specific root length, SRL, $m \cdot g^{-1}$)为总根长和根系生物量比值,即 $SRL = TRL/RB$ 。比根面积(specific root area, SRA, $m^2 \cdot g^{-1}$)为根表面积与根系生物量比值,即 $SRA = RSA/RB$ 。根组织密度(root tissue density, RTD, $mg \cdot cm^{-3}$)为根系生物量与总根体积比值。

1.4 数据分析

图表中数据均为单株柳枝稷的对应指标,用平均值和标准误表示测定结果。采用Sigmaplot 12.0 (Systat, USA)绘图,用Genstat 19.1 (VSN international Ltd., UK)进行统计分析。不同水分水平和磷处理间各指标差异显著性采用单因素方差分析(One-way ANOVA),并用Duncan法进行多重比较。Genstat中用于裂区试验设计(Split-plot design)的方差分析来检验水分、磷及二者互作对根冠生物量和根系形态特征的影响($P = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生物量与根冠比

水分和磷均显著影响柳枝稷根冠生物量,水分和磷交互作用对根冠生物量无显著影响(表1)。不论施磷与否,HW水平下柳枝稷地上生物量和根系生物量均大于LW。HW水平下, $P_{0.05}$ 和 $P_{0.1}$ 处理分别较 P_0 的地上生物量显著增加58%和100%($P < 0.05$),根系生物量显著增加57%和67%。LW水平下,各施磷处理间地上生物量和根系生物量均无显著差异($P > 0.05$)(图1)。这些表明水分是影响柳枝稷根冠生长的主要因素,施磷对柳枝稷生物量

表 1 水分、磷及其交互作用对柳枝稷根冠生物量及水分利用效率的影响
Table 1 Analysis of variance for the effects of water and phosphorus on aboveground biomass, root biomass and water use efficiency of switchgrass

因子 Factor	df	地上生物量 AGB		根冠生物量 RB		根冠比 RSR		蒸腾耗水量 T		水分利用效率 WUE	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
		水分水平 Water regime (WR)	1	52.85	0.01	355.80	<0.001	18.42	0.01	160.50	<0.001
磷处理 Phosphorus treatment (PT)	2	8.87	0.01	5.29	0.02	6.38	0.01	1.59	0.23	10.45	0.01
WR × PT	2	3.39	0.06	3.48	0.06	0.00	1.00	3.23	0.07	1.80	0.20

AGB: aboveground biomass; RB: root biomass; RSR: root to shoot ratio; T: transpiration water; WUE: water use efficiency.

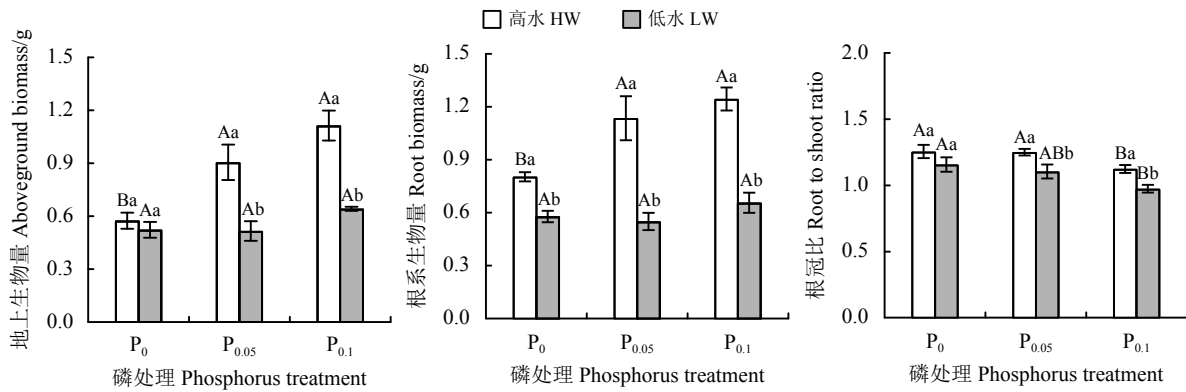


图 1 不同水分与磷处理下柳枝稷地上生物量、根系生物量和根冠比
Figure 1 Aboveground Biomass, root biomass and root/shoot ratio of switchgrass under different water regime and phosphorus treatments

高水：80%田间持水量，低水：40%田间持水量。P₀：不施磷，P_{0.05}：0.05 g P₂O₅·kg⁻¹干土，P_{0.1}：0.1 g P₂O₅·kg⁻¹干土。柱上不同大写字母表示同一水分下磷处理间差异显著 (P < 0.05)，不同小写字母表示同一磷处理下水分水平间差异显著 (P < 0.05)。下图同。

HW: high water, 80% field capacity; LW: low water, 40% field capacity. P₀: no phosphorus application, P_{0.05}: 0.05 g P₂O₅·kg⁻¹ dry soil, P_{0.1}: 0.1 g P₂O₅·kg⁻¹ dry soil. Different uppercase above the columns indicate significant differences among phosphorus treatments under each water regime (P < 0.05), while different lowercase indicate significant differences between different water regimes under each phosphorus treatment (P < 0.05); similarly for the following figures.

累积的效应与土壤水分条件有关。

随着施磷量的增加，柳枝稷根冠比呈降低趋势。HW水平下，柳枝稷的根冠比以P_{0.1}处理显著最低 (P < 0.05)，P_{0.05}和P₀间无显著差异 (P > 0.05)。LW水平下，P_{0.1}处理的根冠比显著低于P₀，但均与P_{0.05}处理间无显著差异。水分和磷交互作用对根冠比无显著影响 (表 1)。

2.2 蒸腾耗水量与水分利用效率

水分对蒸腾耗水量有显著影响 (表 1)，HW水平下柳枝稷蒸腾耗水量显著大于LW (P < 0.05)。HW水平下，P_{0.1}的蒸腾耗水量显著大于P₀处理，但均与P_{0.05}处理无显著差异。LW水平下，P_{0.05}和P_{0.1}分别较P₀处理的蒸腾耗水量显著降低了28%和16%

(图 2)。

水分和磷显著影响柳枝稷水分利用效率，水磷交互作用对水分利用效率无显著影响 (表 1)。不论施磷与否，HW水平下柳枝稷水分利用效率显著小于LW (P < 0.05)。施磷显著提高了两个水分水平下柳枝稷水分利用效率 (图 2)。

2.3 根系形态指标

HW水平下柳枝稷总根长和根表面积均显著大于LW (P < 0.05)。HW水平下，P_{0.05}和P_{0.1}分别较P₀处理的总根长显著提高35%和49%，根表面积显著提高43%和50% (表 2)。LW水平下，P_{0.1}较P₀处理的总根长和根表面积显著提高33%和23%，P_{0.05}和P₀间无差异。水分和磷对总根长和根表面积有显著

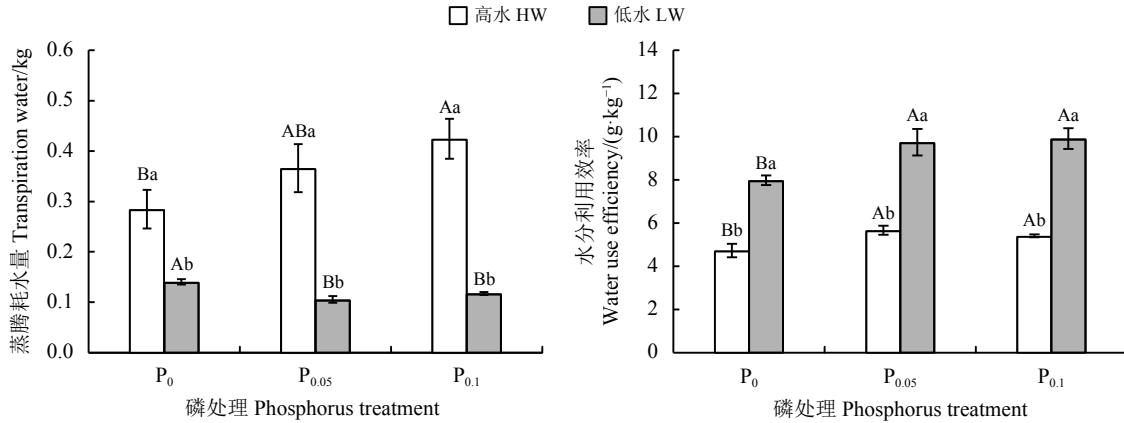


图 2 不同水分与磷处理下柳枝稷蒸腾耗水量和水分利用效率

Figure 2 Transpiration water and water use efficiency of switchgrass under different water and phosphorus treatments

表 2 不同水分与磷处理下柳枝稷总根长、根表面积和根系平均直径

Table 2 Total root length (TRL), root surface area (RSA) and root average diameter (RAD) of switchgrass under different water regime and phosphorus treatments

磷处理 Phosphorus treatment	总根长 TRL/m		根表面积 RSA/m ²		根系平均直径 RAD/mm	
	高水HW	低水LW	高水HW	低水LW	高水HW	低水LW
P ₀	27.2 ± 1.4Ba	19.6 ± 1.2Bb	0.030 ± 0.002Ba	0.022 ± 0.001Bb	0.37 ± 0.01Aa	0.36 ± 0.01Aa
P _{0.05}	36.8 ± 2.7Aa	19.7 ± 1.1Bb	0.043 ± 0.004Aa	0.022 ± 0.001Bb	0.37 ± 0.01Aa	0.34 ± 0.01Bb
P _{0.1}	40.4 ± 3.6Aa	26.0 ± 1.4Ab	0.045 ± 0.003Aa	0.027 ± 0.001Ab	0.37 ± 0.01Aa	0.33 ± 0.01Bb

高水：80%田间持水量，低水：40%田间持水量。P₀：不施磷，P_{0.05}：0.05 g P₂O₅·kg⁻¹ 干土，P_{0.1}：0.1 g P₂O₅·kg⁻¹ 干土。同列不同大写字母表示同一水分下不同磷处理间差异显著(P < 0.05)，同行不同小写字母表示同一磷处理下不同水分间差异显著(P < 0.05)。表4同。

HW: high water, 80% field capacity; LW: low water, 40% field capacity. P₀: no phosphorus application, P_{0.05}: 0.05 g P₂O₅·kg⁻¹ dry soil, P_{0.1}: 0.1 g P₂O₅·kg⁻¹ dry soil. Different capital letters within the same column indicate significant differences among phosphorus treatments under each water regime (P < 0.05), while different lowercase letters within the same row indicate significant differences between different water regimes under each phosphorus treatments (P < 0.05); similarly for Table 4.

影响，水分和磷互作对总根长无显著影响(表3)。

施磷处理下，HW水平的柳枝稷根系平均直径均显著大于LW(P < 0.05)。HW水平下，各施磷处理间根系平均直径无显著差异(P > 0.05)。LW水平下，P_{0.05}和P_{0.1}处理分别较P₀的根系平均直径显著降低5%和8%(表2)。水分水平对根系平均直径有显著影响，施磷及其与水分交互作用对根系平均直径无影响(表3)。

各处理下，0~0.5 mm径级的根长约占柳枝稷总根长的75%，约占根表面积的60%(图3)，表明0~0.5 mm是对总根长和根表面积贡献最多的径级组成。HW水平下，P_{0.05}和P_{0.1}分别较P₀处理的0~0.5 mm径级根长显著提高25%和56%(P < 0.05)，根表面积分别提高28%(P > 0.05)和53%(P < 0.05)；P_{0.05}和P_{0.1}分别较P₀处理的0.5~1.0 mm径级根长

显著提高49%和43%，根表面积显著提高50%和42%。LW水平下，P_{0.05}和P_{0.1}分别较P₀处理的0~0.5 mm径级根长提高5%(P > 0.05)和34%(P < 0.05)，根表面积提高3%(P > 0.05)和30%(P < 0.05)(图3)，表明LW下施磷可促进柳枝稷细根生长。

HW水平下，柳枝稷的比根长均小于LW，仅P_{0.1}施磷处理下HW与LW间差异显著。LW水平下，P_{0.05}和P_{0.1}分别较P₀处理的比根长提高5%(P > 0.05)和18%(P < 0.05)(表4)。水分水平对比根长有显著影响，磷及其与水分的互作对比根长无显著影响(表3)。

各处理下，柳枝稷根组织密度介于260~310 mg·cm⁻³，比根面积介于0.036~0.043 m²·g⁻¹(表4)。各施磷处理下，根组织密度或比根面积在HW与LW间无显著差异(P > 0.05)。各水分水平下，不

表 3 水分与磷及其交互作用对柳枝稷根系形态特征参数的影响

Table 3 Analysis of variance for the effects of water and phosphorus on root morphological characteristics of switchgrass

因子 Factor	df	总根长 TRL		根表面积 RSA		根系平均直径 RAD		比根长 SRL		根组织密度 RTD		比根面积 SRA	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
		水分水平 Water regime (WR)	1	90.06	<0.001	114.58	<0.001	13.40	0.02	6.88	0.04	0.31	0.61
磷处理 Phosphorus treatment (PT)	2	9.14	0.01	7.94	0.01	1.32	0.30	0.67	0.53	0.36	0.70	0.26	0.77
WR × PT	2	2.49	0.11	4.08	0.04	3.53	0.06	1.96	0.17	0.796	0.47	0.80	0.47

TRL: total root length; RSA: root surface area; SRL: specific root length; SRA: specific root area; RAD: root average diameter; RTD: root tissue density.

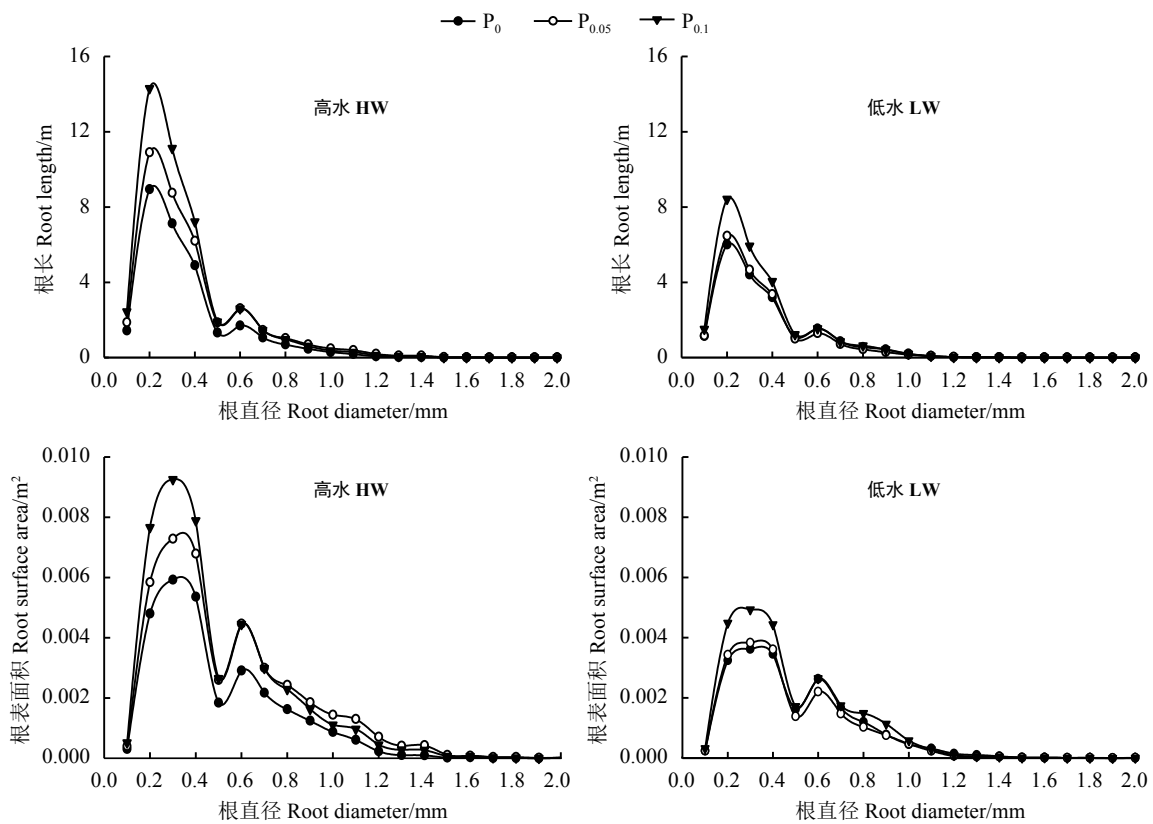


图 3 不同水分与磷处理下柳枝稷根长与根表面积的直径分布

Figure 3 Root length and root surface area of different root diameters of switchgrass under different water regime and phosphorus treatments

同施磷处理间根组织密度或比根面积均无显著差异 ($P > 0.05$) (表 4)。水分水平、磷处理及其交互作用对二者均无显著影响 ($P > 0.05$) (表 3)。

粗根和细根的根长与根生物量间均呈极显著的线性关系 ($P < 0.01$), 且不受水分水平的影响 (图 4)。总根长与根系生物量间也存在极显著线性关系 ($P < 0.01$), 其中 HW 下回归直线斜率为 21.18, LW 下为 40.56, 表明 LW 下单位根生物量的根系更长。

3 讨论与结论

水分影响植物根冠发育以及磷肥的有效性^[2,6,14], 充分利用水分和磷间的耦合关系可显著提高植物生物量^[9]。本研究中, 水分是影响柳枝稷根冠生长的主要因素 (图 1), 施磷对柳枝稷生物量累积的效应与土壤水分条件有关, 表明水分和磷同时添加有利于提高柳枝稷根冠生物量^[9]。研究表明, 柳枝稷生

表 4 不同水分与磷处理下柳枝稷的根组织密度、比根长和比根面积
Table 4 Root tissue density (RTD), specific root length (SRL) and specific root area (SRA) of switchgrass under different water and phosphorus treatments

磷处理 Phosphorus treatment	比根长 SRL/(m·g ⁻¹)		根组织密度 RTD/(mg·cm ⁻³)		比根面积 SRA/(m ² ·g ⁻¹)	
	高水 HW	低水 LW	高水 HW	低水 LW	高水 HW	低水 LW
P ₀	34.0 ± 2.3Aa	34.1 ± 0.8Ba	294.0 ± 19.0Aa	294.8 ± 13.0Aa	0.037 ± 0.003Aa	0.038 ± 0.001Aa
P _{0.05}	33.1 ± 1.9Aa	35.9 ± 1.8ABa	277.8 ± 9.4Aa	288.7 ± 15.6Aa	0.039 ± 0.002Aa	0.040 ± 0.002Aa
P _{0.1}	32.4 ± 2.4Ab	40.2 ± 1.4Aa	308.1 ± 11.9Aa	281.4 ± 13.5Aa	0.036 ± 0.002Aa	0.042 ± 0.003Aa

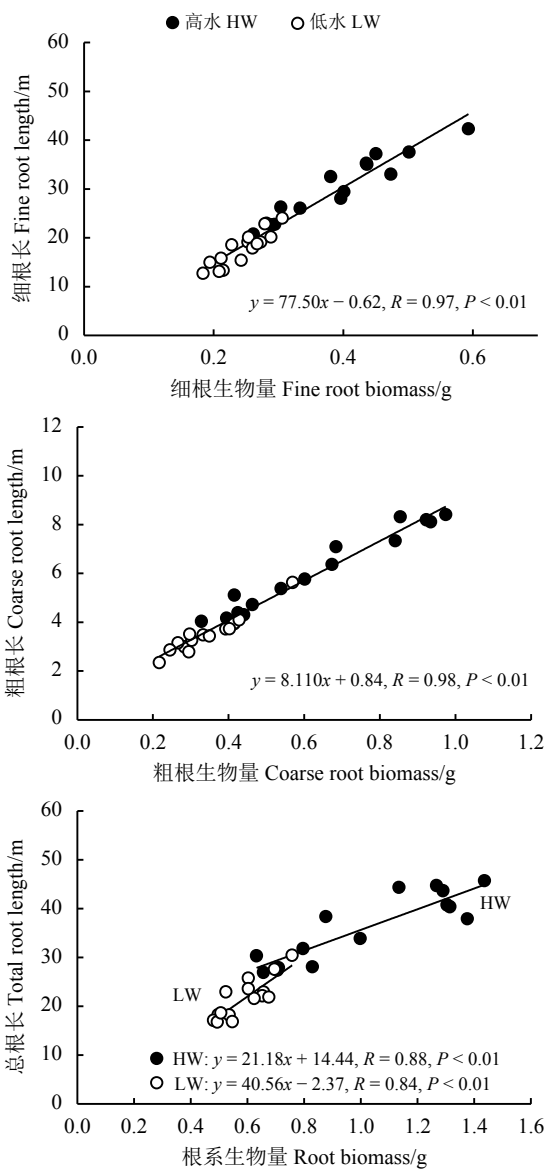


图 4 不同水分与磷处理下柳枝稷根长 (y) 与根系生物量 (x) 的关系

Figure 4 Relationships of root length (y) with root biomass (x) of switchgrass under different water and phosphorus treatments

细根: 0~0.5 mm 径级的根; 粗根: >0.5 mm 径级的根。
 Fine roots (0~0.5 mm), coarse roots (>0.5 mm).

物量的提高会增加其体内磷含量^[17], 建植多年的柳枝稷其每年生物量的收获会导致土壤磷和植株体内磷含量的持续降低^[17], 因此, 柳枝稷草地可适当追施磷肥以维持年度产量和质量。

提高根冠比是植物适应逆境的重要策略^[9]。本研究中, 两种水分水平下, 随施磷量增加, 柳枝稷根冠比均呈降低趋势, 说明柳枝稷是通过提高根冠比来适应低磷环境条件(图 1)。一般来说, 干旱胁迫会导致柳枝稷等禾本科植物的根冠比提高^[2, 9, 14]; 有研究表明, 一定干旱条件下柳枝稷的根冠比降低或保持不变, 这主要与其受到的干旱胁迫的时期和程度有关^[4, 18-19]。本研究进行水分控制时柳枝稷即将进入生殖生长期, 前期良好的水分供应条件使得根系发育良好^[2, 19], 控水后地上部光合产物向根系生物量分配减小, 从而导致根冠比降低^[20]。

HW 水平下, 施磷提高柳枝稷蒸腾耗水量和 WUE, 这是由于适宜的水分和磷营养可促进地上部生长, 增加植株蒸腾水分消耗, 而施磷使生物量的增加量远大于蒸腾耗水增加量(图 1 和图 2)^[21]。LW 水平下, 施磷处理下柳枝稷蒸腾耗水量显著降低, 但 WUE 显著提高, 这是由于低水下植物体内磷含量提高可增强其气孔调节能力, 降低蒸腾耗水量和提高 WUE^[7]。

总根长和根表面积反映植物根系在土壤中的分布空间和与土壤的接触面积, 一定程度上反映植物根系吸收能力^[2, 16]。LW 水平下, 适当施磷(P_{0.1}处理)可显著提高柳枝稷总根长和根表面积(表 2), 说明施磷可促进低水条件下柳枝稷根系生长和吸收能力提高^[6]。细根(0~0.5 mm)是植物根系中对土壤磷含量变化最为敏感的部分^[16]。本研究中, 0~0.5 mm 的根系是对总根长和根表面积贡献最多的径级组成(图 3)。施磷均不同程度地提高了两种

水分水平下柳枝稷总根长和根表面积，其中 LW 下施磷对根系生物量无显著影响(图 1)，但显著提高了总根长和根表面积，表明低水下适当施磷主要促进柳枝稷细根生长(图 3)，有利于提高根系吸收能力和呼吸代谢速率^[16]。施磷提高植物体内的磷含量从而改变根系形态^[5-6, 10]，因此施磷对建植多年柳枝稷的根系生长可能具有类似效应。

比根长增大说明单位根系生物量下根长增加，有利于提高根系对水分的吸收能力，是植物应对干旱环境的重要适应策略^[6]。根组织密度反映根系的生长代谢速率和根系吸收能力。比根长的提高主要归因于根组织密度的降低和根系平均直径的降低^[10, 22]。本研究中，LW 下柳枝稷比根长显著提高，而根组织密度无显著变化，说明根系平均直径的降低是导致比根长提高的主要原因(表 2、表 3)，这是由于对禾本科植物来说，根系平均直径的变化对比根长的调节更加高效^[23]。研究表明，根系平

均直径的降低是由于粗根和细根直径均降低或细根分配比例提高^[22]，柳枝稷粗根和细根的根系直径大小在土壤水分变化时具有较强的稳定性^[24](图 4)，说明 LW 水平下细根分配比例的提高会导致根系平均直径降低，并提高了比根长。

综上所述，水分是影响柳枝稷生物量和根系生长的主要因素。充分供水条件下，施磷可提高柳枝稷根冠生物量和促进根系生长；低水供应条件下，适当施磷促进柳枝稷细根生长，提高其水分利用效率，表明低水下施磷有利于提高根系吸收能力和对干旱的适应性。柳枝稷主要通过降低根系平均直径和提高比根长适应低水环境，通过提高根冠比适应低磷环境。本研究重点探讨柳枝稷建植当年水分供应条件改变后，施磷与否对其生物量及根系形态特征的影响，有必要进一步研究干旱条件下施磷对建植多年柳枝稷根冠生长的影响，为黄土丘陵区柳枝稷栽培草地的水肥管理提供依据。

参考文献 References:

- [1] 山仑, 徐炳成. 黄土高原半干旱地区建设稳定人工草地的探讨. *草业学报*, 2009, 18(2): 1-2.
SHAN L, XU B C. Study on constructing stable artificial grassland in semi-arid area of Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(2): 1-2.
- [2] MANN J J, BARNEY J N, KYSER G B, DITOMASO J M. Root system dynamics of *Miscanthus giganteus* and *Panicum virgatum* in response to rainfed and irrigated conditions in California. *Bioenergy Research*, 2013, 6(2): 678-687.
- [3] COONEY D, KIM H, QUINN L, LEE M S, GUO J, CHEN S, XU B, LEE D K. Switchgrass as a bioenergy crop in the Loess Plateau, China: Potential lignocellulosic feedstock production and environmental conservation. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(6): 1211-1226.
- [4] WANG L M, QIAN Y L, BRUMMER J E, ZHENG J, WILHELM S, PARTON W J. Simulated biomass, environmental impacts and best management practices for long-term switchgrass systems in a semi-arid region. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 75: 254-266.
- [5] SCHACHTMAN D P, REID R J, AYLING S M. Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. *Plant Physiology*, 1998, 116(2): 447-453.
- [6] FAN J W, DU Y L, TURNER N C, WANG B R, FANG Y, XI Y, GUO X R, LI F M. Changes in root morphology and physiology to limited phosphorus and moisture in a locally-selected cultivar and an introduced cultivar of *Medicago sativa* L. growing in alkaline soil. *Plant and Soil*, 2015, 392(1/2): 215-226.
- [7] SINGH D K, SALE P W G, PALLAGHY C K, MCKENZIE B M. Phosphorus concentrations in the leaves of defoliated white clover affect abscisic acid formation and transpiration in drying soil. *New Phytologist*, 2000, 146(2): 249-259.
- [8] HUND A, RUTA N, LIEDGENS M. Rooting depth and water use efficiency of tropical maize inbred lines, differing in drought tolerance. *Plant and Soil*, 2009, 318(1/2): 311-325.
- [9] 唐宏亮, 马领然, 张春潮, 段霄霄. 水分和磷对苗期玉米根系形态和磷吸收的耦合效应. *中国生态农业学报*, 2016, 24(5): 582-589.
TANG H L, MA L R, ZHANG C C, DUAN X X. Coupled effect of water and phosphorus on root growth and phosphorus uptake of maize at seedling stage. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(5): 582-589.

- [10] ZOBEL R W, ALLOUSH G A, BELESKY D P. Differential root morphology response to no versus high phosphorus, in three hydroponically grown forage chicory cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 57(1): 201-208.
- [11] XU B, GAO Z, WANG J, XU W, HUANG J. Morphological changes in roots of *Bothriochloa ischaemum* intercropped with *Lespedeza davurica* following phosphorus application and water stress. *Plant Biosystems*, 2015, 149(2): 298-306.
- [12] KERING M K, BUTLER T J, MOSALI J, GURETZKY J A. Biomass yield and nutrient responses of switchgrass to phosphorus application. *Bioenergy Research*, 2012, 5(1): 71-78.
- [13] FOSTER J L, GURETZKY J A, HUO C, KERING M K, BUTLER T J. Effects of row spacing, seeding rate, and planting date on establishment of switchgrass. *Crop Science*, 2013, 53(1): 309-314.
- [14] 赵春桥,陈敏,侯新村,朱毅,武菊英,范希峰. 干旱胁迫对柳枝稷生长与生理特性的影响. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 126-130. ZHAO C Q, CHEN M, HOU X C, ZHU Y, WU J Y, FAN X F. Effect of drought stress on the growth and physiological characteristics of *Panicum virgatum* L. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(3): 126-130.
- [15] WANG Z, XU W, CHEN Z, JIA Z, WEN Z, CHEN Y, XU B. Soil moisture availability at early growth stages strongly affected root growth of *Bothriochloa ischaemum* when mixed with *Lespedeza davurica*. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1050.
- [16] LI H B, MA Q H, LI H G, ZHANG F S, RENGEL Z, SHEN J B. Root morphological responses to localized nutrient supply differ among crop species with contrasting root traits. *Plant and Soil*, 2014, 376(1/2): 151-163.
- [17] DE GRAAFF M A, SIX J, JASTROW J D, SCHADT C W, WULLSCHLEGER S D. Variation in root architecture among switchgrass cultivars impacts root decomposition rates. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 198-206.
- [18] 左海涛,李继伟,郭斌,宋尚有,高旺盛. 盐分和土壤含水量对营养生长期柳枝稷的影响. 草地学报, 2009, 17(6): 760-766. ZUO H T, LI J W, GUO B, SONG S Y, GAO W S. Effect of soil salinity type and concentration as well as soil water content on the growth characteristics of switchgrass at the vegetative stage on two soil matrixes. *Acta Agraria Sinica*, 2009, 17(6): 760-766.
- [19] HENDRICKSON J R, SCHMER M R, SANDERSON M A. Water use efficiency by switchgrass compared to a native grass or a native grass alfalfa mixture. *Bioenergy Research*, 2013, 6(2): 746-754.
- [20] 张娜,梁一民. 干旱气候对白羊草群落地下部生长影响的初步观察. 应用生态学报, 2002, 13(7): 827-832. ZHANG N, LIANG Y M. Effect of arid climate on underground growth of *Bothriochloa ischaemum* community. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 827-832.
- [21] HE J, JIN Y, DU Y L, WANG T, TURNER N C, YANG R P, SIDDIQUE K H M, LI F M. Genotypic variation in yield, yield components, root morphology and architecture, in soybean in relation to water and phosphorus supply. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1499-1509.
- [22] POORTER H, RYSER P. The limits to leaf and root plasticity: what is so special about specific root length? *New Phytologist*, 2015, 206(4): 1188-1190.
- [23] MA Z, GUO D, XU X, LU M, BARDGETT R D, EISSENSTAT D M, MCCORMACK M L, HEDIN L O. Erratum: Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. *Nature*, 2018, 555: 48-56.
- [24] ANDERSON T M, STARMER W T, THORNE M. Bimodal root diameter distributions in Serengeti grasses exhibit plasticity in response to defoliation and soil texture: Implications for nitrogen uptake. *Functional Ecology*, 2007, 21(1): 50-60.

(责任编辑 武艳培)