

红薯光合特征对土壤透气性的响应

赵纯¹ 邵明安^{2,3} 魏孝荣^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 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;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 通过盆栽试验研究了不同土壤质地和水分条件下红薯光合特性对土壤透气性的响应。结果表明: 土壤透气性显著影响红薯叶片蒸腾速率和水分利用效率, 随土壤透气性的增加, 蒸腾速率显著降低, 水分利用效率显著增加, 红薯的光合作用不受土壤透气性的影响; 透气性对红薯蒸腾和水分利用效率的影响与土壤质地有关, 在沙土地下, 红薯的光合速率、蒸腾速率和水分利用效率均不受透气性影响, 而在壤土地下, 红薯的蒸腾速率随透气性的增加显著降低, 而水分利用效率显著增加; 透气性对红薯光合特性的影响与生育期有关, 不同生育期内, 红薯光合特征对土壤透气性的响应也不同。研究表明, 在分析作物对土壤透气性的响应时, 需要考虑土壤质地、水分条件和生育期的影响。

关键词: 红薯; 土壤透气性; 水分条件; 土壤质地; 光合特性; 水分利用效率

中图分类号: S531.06 文献标志码: A

Responses of sweet potato's photosynthetic characteristics to soil permeability

ZHAO Chun¹, SHAO Ming-an^{2,3}, WEI Xiao-rong^{1,2}

(1. Department of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling,

Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Soil permeability had great effect on the growth and the water use efficiency of sweet potato. In this study, responses of photosynthetic characteristics of sweet potato to soil permeability in different soil textures and soil water conditions were observed through a pot experiment. Results indicated that soil permeability had significant effect on the transpiration rate and water use efficiency of sweet potato. When the soil permeability became increased, the transpiration rate became decreased, but the water use efficiency was increased. Also, it seemed that soil permeability did not affect the photosynthetic rate of sweet potato. In addition, it was found that the effects of soil permeability on the transpiration rate and water use efficiency were related to soil compositions. Permeability of sandy soil showed no effect on photosynthetic rate, transpiration rate, and water use efficiency. However, loam soil decreased the transpiration rate and increased the water use efficiency. The effects of soil permeability on the photosynthetic characteristics were also related to the growth period of sweet potato, resulting in various response patterns. These results showed that the impacts of soil texture, water, and growth period must all be taken into consideration when analyzing the responses of crops to soil permeability.

Keywords: sweet potato; permeability; water condition; soil texture; photosynthetic characteristics; water use efficiency

土壤透气性、质地以及水分条件是影响土壤水分有效性和植物生长的重要土壤物理性质。土壤质

地决定着土壤水分运动和有效性、通透性及养分的有效性, 是植物生长的决定因素。土壤的透气性主

收稿日期: 2014-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(91025018)与中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB3-13-02)

作者简介: 赵纯(1990—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理学研究。E-mail: zhaochunaly@126.com。

通信作者: 邵明安(1956—), 男, 湖南常德人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤物理学研究。E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn。

要由土壤中气体的数量决定,提高土壤的通气性在一定程度上可以改善土壤的透气性。且土壤透气性因不同质地土壤的孔隙度而异,在同一质地条件下,土壤水分条件也会影响土壤透气性。如土壤水分含量较高时,土壤空隙充水透气性减低,反之透气性增加。

红薯是我国重要的经济作物之一,富含维生素 C 和胡萝卜素,具有很高的营养价值^[1]。在我国的种植面积约占全世界的 70%^[2]。红薯的生长,尤其是在块根膨大时期对土壤的透气性改变非常敏感,已有研究表明通过改善土壤的通气性可以增加红薯叶片中钾、钙、锰、硼和锌的含量,增加块根中钾和钙的含量,减少块根中锰、硼和锌的含量,促进同化物由叶片向块根的运转和分配,提高块根中淀粉含量,极显著地提高块根产量^[3]。目前就土壤的透气性对红薯生长的影响研究主要集中在产量方面^[4-6],而且只分析了红薯生长对土壤通气性的单一因素变化的响应,很少有研究把土壤的多个物理特性结合起来作为影响红薯生理特性的因素,并分析不同生育期间红薯生理特性的差异。基于土壤透气性、土壤水分条件和土壤质地相互影响并均对植物的生长有重要的影响,本文研究了不同土壤透气性、水分条件及土壤质地条件下及不同生育期红薯的叶片净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率对其变化的响应,分析了红薯对土壤透气性、水分条件及质地等因素交互作用的响应,以期为红薯种植的适宜土壤条件选取及水分利用效率的提高提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和方法

本研究于 2012 年在中国科学院水利部水土保持研究所进行。供试土壤采自西北农林科技大学试验农场 0~20 cm 土壤。试验土壤为瘠土,耕层土壤有机质含量 $11.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (有机碳含量 $6.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),全氮 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $61.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷(纯磷) $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $295.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 8.3^[7],质地属重壤土,颗粒组成为:16.6%粘粒($<0.001 \text{ mm}$),62.4%粗粉粒($0.01 \sim 0.05 \text{ mm}$),21%砂粒($0.05 \sim 1 \text{ mm}$)^[8]。供试沙子为渭河河沙,供试沙子和土壤均过 2 mm 筛,风干备用。供试容器为塑料桶(高 26.0 cm,上口径 29.5 cm,下口径 21.6 cm)。本实验采用盆栽法,共设置两种土壤质地(重壤土和按照重壤土与河沙质量比 1:1 均匀混合的沙质土),两个土壤水分水平(50%~70% FC 和 70%~90% FC)

以及 5 个透气性水平(在塑料桶上钻取的直径为 1.5 cm 的透气孔数分别是 0、2、4、6、8),共 20 个处理,每个处理重复 3 次。装桶时按照塑料桶体积的 4/5 填充,其中壤土质地为:底部填充 3 197 g 沙子,上面填充 12 369 g 风干土;沙质土为:底部 3 197 g 沙子和 6 665 g 风干土与 6 463 g 沙子的混合物。壤土和沙质土的容重和田间持水量分别是 $1.21 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,26.44% 和 18.89%。在装桶时均匀混入总质量 4% 的有机肥,肥料为台湾肥佳果多公司生产。同时在土壤的表层覆盖 3 cm 厚的工业蛭石,防止土壤水分蒸发。所有的实验桶均放在塑料棚下,以免下雨造成对水分处理的干扰。

供试红薯为“秦薯 4 号”2012 年初开始育苗,5 月 12 日选择长势均匀的秧苗移入桶中,每桶 1 株。在桶中插入约 35 cm 长的浇水管,浇水时从管中加入,避免造成表层土壤板结。实验开始第一周对盆栽充分供水保证存活,5 月 19 日开始按照设定土壤水分含量水平严格控水。在 10 月 16 日霜降(10 月 23 日)附近对红薯进行收获。红薯的生长期分为四个生育期,分别是扎根缓苗期(I,6 月 27 日)、分支结薯期(II,7 月 11 日)、茎叶盛长期块根膨大期(III,7 月 28 日)以及茎叶衰退块根膨大期(IV,8 月 11 日)。光合参数的测定也分别在这四个时期。

1.2 参数测定及方法

土壤水分特征曲线和田间持水量:土壤水分特征曲线的测定采用环刀离心法测定,壤土的田间持水量为土壤特征曲线上 300 MPa 吸力下对应的土壤含水量,沙质土的田间持水量为土壤特征曲线上 200 MPa 吸力下对应的土壤含水量。两种土壤质地水分特征曲线见图 1。

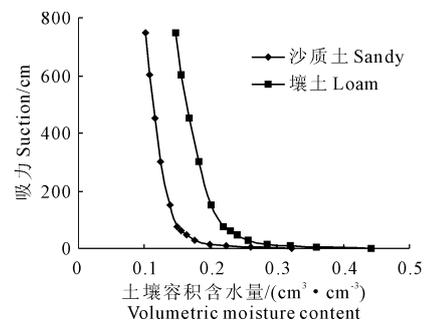


图 1 供试土壤水分特征曲线

Fig. 1 The soil water characteristic curve of the studied soils

光合特性的测定:用 LI-6400 光合仪测定红薯由上至下第五片完全展开的叶子测定光合指标,叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)。每个指标重复测定 3 次。参数设定为:光强 $1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

s^{-1} , CO_2 浓度 $400 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 。按照公式 $WUE = Pn/Tr$ 计算红薯叶片的瞬时水分利用效率。

土壤水分条件控制: 以田间持水量为标准, 用电子秤(感量为 1 g) 每天晚上 6: 00—6: 30 进行称重, 及时补充水分将水分条件控制在设定的水分水平(不低于下限并不超过上限)。

1.3 数据分析

采用 SPSS18.0 进行一元线性回归分析和方差分析, 显著水平设为 $\alpha = 0.05$, 用 Excel 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 土壤透气性对红薯光合作用和水分利用的影响

本研究中土壤透气性对红薯叶片光合速率没有显著影响($P = 0.486$, 图 2), 但是随着土壤透气性的增加, 红薯叶片蒸腾速率显著降低($P = 0.020$, 图 2), 叶片水平上的水分利用效率显著增加($P = 0.017$, 图 2)。如整个试验期内, 土壤透气孔从 0 个增加到 8 个, 红薯叶片光合速率变化在 $14.0 \sim 16.7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 而叶片蒸腾速率从 $4.8 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 $4.1 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (降低

了 15%)。水分利用效率从 $3.2 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 增加到 $3.7 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ (增加了 15%)。由于本研究中光合速率不受土壤透气性的影响, 因此土壤透气性增加后叶片水分利用效率的增加主要是蒸腾速率的减少引起的。这与张娟等对小麦干旱条件下水分利用效率的提高是通过降低蒸腾作用的结果一致^[9]。龚吉蕊等也发现植物会通过降低蒸腾提高水分利用效率^[10]。本研究中土壤透气性的增加对蒸腾作用的抑制和对水分利用效率的促进作用可能与土壤-植物-大气系统水分传输过程改变有关。随着土壤透气性的提高, 土壤水势降低, 根界面和土壤-植物-大气连续体中水流阻力增大^[11], 土壤水分和植物水分损失减弱^[12], 在植物光合速率没有受到显著影响的情况下, 植物蒸腾速率便逐渐降低, 水分利用效率有所提高。此外, 刘义玲等的研究发现低氧胁迫会影响根的呼吸代谢, 植株生长受到抑制^[13]。另一方面, 随透气性增加, 根际氧气浓度增加, 植物根系活动增强^[14], 对土壤养分的吸收增加^[15], 植物叶片功能增强, 同化单位质量 CO_2 所需的水分较少^[16], 相应的蒸腾作用降低, 水分利用效率提高。

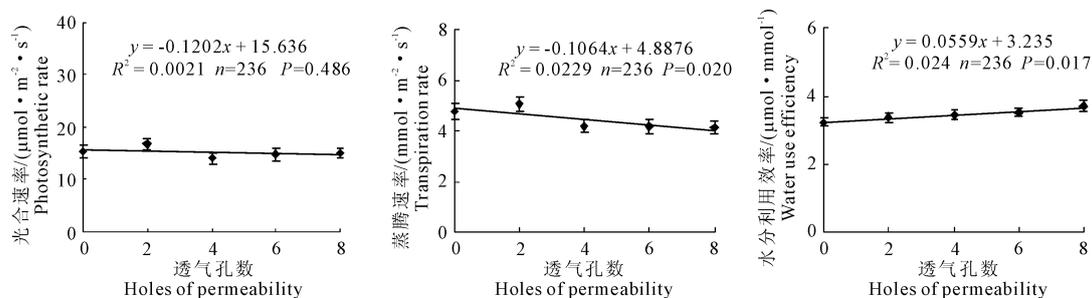


图 2 土壤透气性对光合速率、蒸腾速率及水分利用效率的影响

Fig. 2 The effect of soil permeability on the photosynthetic rate, transpiration rate and water use efficiency

2.2 不同土壤质地和水分条件下红薯的光合作用和水分利用效率

土壤透气性对红薯光合作用和水分利用的影响与土壤质地有关, 而与水分条件无关, 因为在不同土壤水分条件下土壤透气性对红薯光合、蒸腾及水分利用效率的影响均不显著($P > 0.05$, 图 3)。但是对于壤土来说, 随着土壤透气性能的增加, 高水和低水水分条件下光合速率均没有受到显著影响($P > 0.05$), 但是红薯叶片蒸腾速率分别降低了 42.6% 和 43.6% ($P = 0.010$ 和 0.005 , 图 3a, b); 水分利用效率分别增加了 33.4% 和 12.9% ($P = 0.018$ 和 0.071 , 图 3a, b)。而对于沙质土来说, 红薯叶片光合速率、蒸腾速率和水分利用效率均不受土壤透气性的影响($P > 0.05$, 图 3c, d)。这种结果可能与不同

土壤质地的持水能力以及透气性对土壤持水能力的改变有关。与沙质土壤相比, 壤土的持水能力较高, 随着土壤含水量的下降, 土壤水吸力增加水势降低较快(图 1), 土根界面和土壤-植物-大气连续体中水流阻力增加也较快, 因蒸腾作用损失的水分显著减少, 水分利用效率则会增加。黄明斌等的研究结果也表明, 植物蒸腾速率和水流阻力呈负相关, 随着蒸腾速率的增加, 水流阻力减小, 最后趋近于一个定值^[17]。此外, 本试验中壤土中有效态养分含量较高, 植物生长状况以及叶片功能较好, 同化单位质量 CO_2 所需的水分也少于沙质土壤, 因此随着土壤透气性能的增强, 壤土水分利用效率逐渐提高。同时, 地上部分的生长与根系的水分吸收和养分吸收有密切关系, 所以土壤的透气性直接影响根系的生长, 进

而影响地上部分的生长。

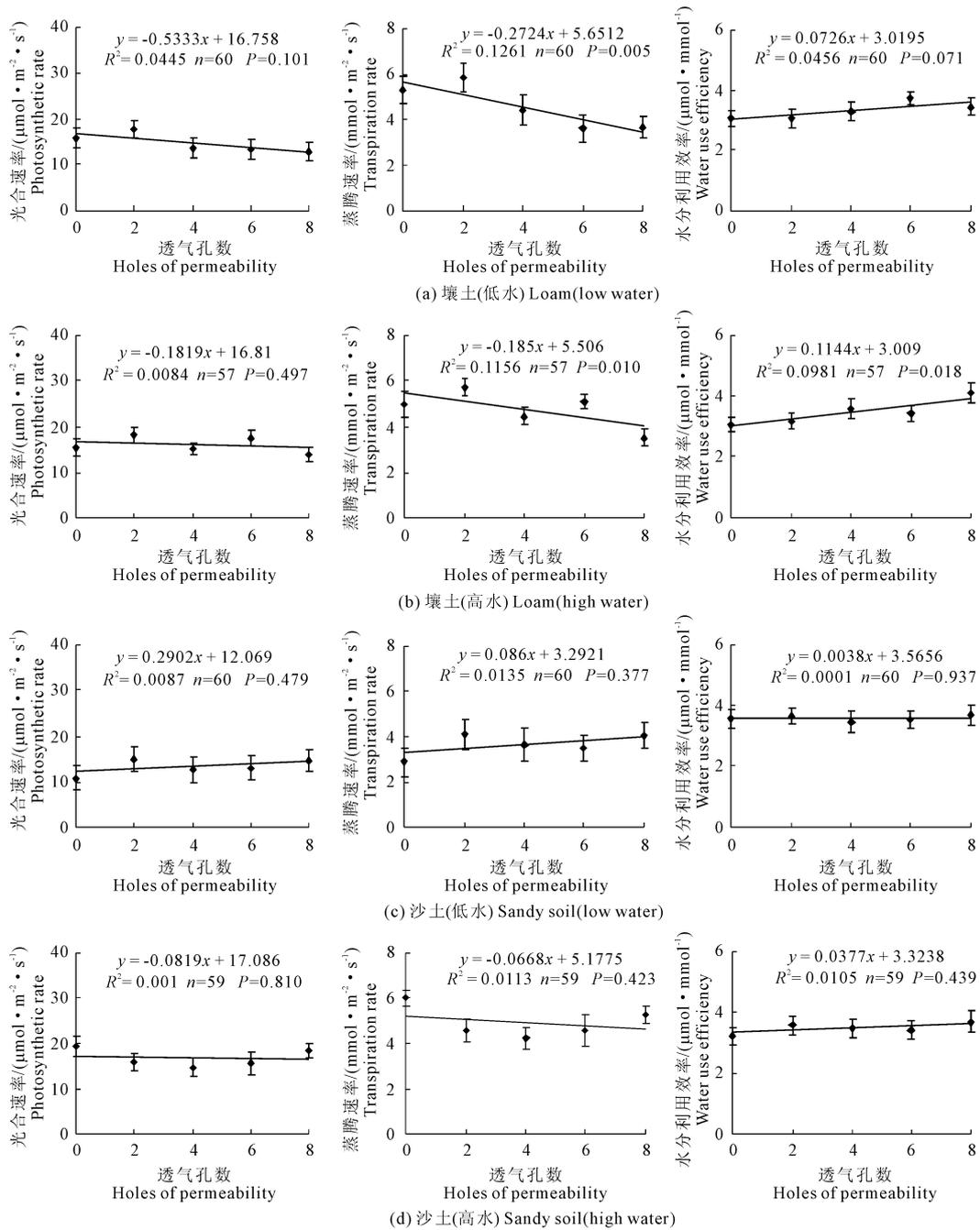


图 3 不同质地和水分条件下土壤透气性对光合速率、蒸腾速率及水分利用效率的影响

Fig. 3 The effect of soil permeability on the photosynthetic rate、transpiration rate and water use efficiency in different soil texture and water condition

2.3 红薯光合作用和水分利用效率对透气性响应随生长季的变化

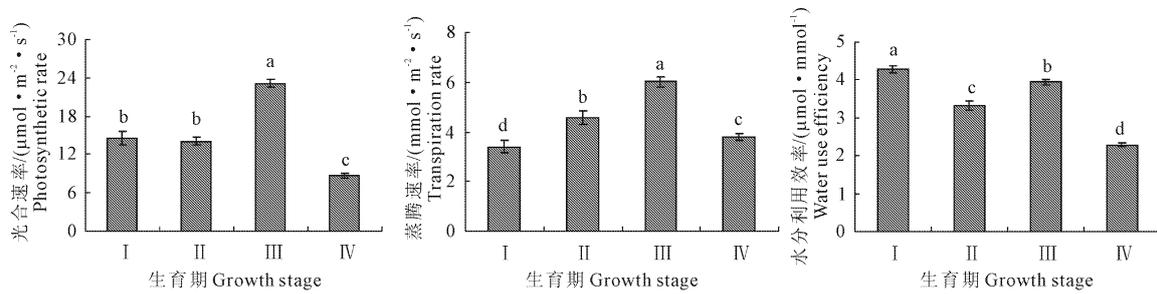
综合所有处理来看,红薯生长的不同时期叶片光合速率、蒸腾速率和水分利用效率差异显著 ($P < 0.001$),如茎叶盛长块根膨大期叶片光合速率最高,分别是扎根稳缓苗、分支结薯期和茎叶衰退块根膨大期的 1.59、1.64 和 2.66 倍,蒸腾速率分别是扎根换苗期、分支结薯期和茎叶衰退块根膨大期的

1.77、1.31 和 1.58 倍;扎根换苗期、分支结薯期和茎叶盛长块根膨大期叶片水分利用效率则显著高于茎叶衰退块根膨大期,分别是茎叶衰退块根膨大期的 1.29、1.09 和 1.87 倍(图 4)。但是本研究中光合速率、蒸腾速率和水分利用效率不受生育期和透气性的交互影响 ($P > 0.05$),如扎根缓苗期光合速率和蒸腾速率不受透气性影响,但是水分利用效率增加了 21.1% ($P = 0.026$),分支结薯期和茎叶衰退块

根膨大期光合速率、蒸腾速率和水分利用效率均不受透气性影响 ($P > 0.05$)，茎叶盛长块根膨大期光合速率和蒸腾速率降低了 22.3% 和 37.3% ($P = 0.037$ 和 0.003)，水分利用效率降低了 11.7% ($P = 0.013$) (表 1)。这与程建平等^[18]和罗永忠等^[19]所发现的水稻对环境因子变化的响应因生育期而异的结果相一致。这种不同生育期红薯叶片光合速率和水分利用特征对透气性响应的差异与不同时期红薯根系以及叶片生理特征及对养分等资源吸收利用的差异有关。如扎根期需要较多的水分供给以促进新根的生长，分支结薯期和茎叶盛长块根膨大期地上部分长势旺盛，光合作用逐渐增强。在红薯的茎叶衰退块根膨大期，更多的养分被分配给块茎，所以地上部分的光合作用减弱，这也是植物充分利用资源并适应环境的表现。因此，分析植物特别是块根类作物对

土壤透气性的响应时更应该考虑生育期的影响。

不同生长季红薯叶片光合速率和水分利用效率对透气性响应的影响还与土壤质地有关，对于沙质土壤来说，红薯叶片光合速率和水分利用效率在 4 个生长季均不受透气性的影响；对于壤土来说，光合速率和水分利用效率对透气性的响应因生长季而异，如茎叶盛长块根膨大期高水处理蒸腾速率随透气性增强显著降低，水分利用效率显著增加，扎根缓苗期高水处理蒸腾速率和水分利用效率随土壤透气性的变化接近显著水平，而茎叶衰退块根膨大期水分利用效率在低水和高水处理下均显著提高。这些结果也表明，茎叶盛长和茎叶衰退块根膨大期红薯叶片光合和水分利用对透气性变化响应最为敏感，在红薯田间管理上，应该加强该时期土壤透气性性能的改善，以提高水分利用效率。



注: I 扎根缓苗期; II 分支结薯期; III 茎叶盛长块根膨大期; IV 茎叶衰退块根膨大期。下同。

Note: I: Rooting period; II: Branching period; III: Root expanding period; IV: Decaying period. The same below.

图 4 不同生育期对光合速率、蒸腾速率及水分利用效率的影响

Fig. 4 The effect of growth period on the photosynthetic rate, transpiration rate and water use efficiency

表 1 不同生育期土壤透气性对光合速率、蒸腾速率及水分利用效率的回归分析

Table 1 Regression analyses of soil permeability on photosynthetic rate, transpiration rate, and water use efficiency

项目 Items	I		II		III		IV	
	F	P	F	P	F	P	F	P
P_n	0.115	0.736	0.060	0.808	4.574	0.037	0.402	0.529
T_r	0.172	0.680	0.535	0.468	9.400	0.003	2.374	0.129
WUE	5.231	0.026	0.673	0.415	6.512	0.013	3.320	0.074

3 结 论

通过本研究可以得到如下结论:

1) 土壤透气性显著影响红薯叶片蒸腾速率和水分利用效率，随土壤透气性的增加，蒸腾速率显著降低，水分利用效率显著增加，土壤透气性对红薯的光合作用没有显著的影响。

2) 土壤透气性对红薯蒸腾和水分利用效率的影响与土壤质地有关，在沙土地下，红薯的光合速率、蒸腾速率和水分利用效率均不受透气性影响，而

在壤土地下，红薯的蒸腾速率随透气性的增加显著降低，而水分利用效率显著增加。

3) 光合速率、蒸腾速率和水分利用效率对土壤透气性的响应与不同生育期有关。随透气性的增加，扎根缓苗期光合速率和蒸腾速率不受影响，但是水分利用效率显著增加；分支结薯期和茎叶衰退块根膨大期光合速率、蒸腾速率和水分利用效率均不受土壤透气性变化的影响；茎叶盛长块根膨大期随透气性的增加，光合速率、蒸腾速率和水分利用效率显著降低。

参 考 文 献:

- [1] 何 川. 红薯的营养价值及开发利用[J]. 西部粮油科技, 2003 (5): 44-46.
- [2] Laurie S M, Faber M, Jaarsveld P J van, et al. β -Carotene yield and productivity of orange-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* L. Lam.) as influenced by irrigation and fertilizer application treatments[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 142: 180-184.
- [3] 史春余, 王振林, 郭风法, 等. 土壤通气性对甘薯养分吸收、 ^{14}C -同化物分配及产量的影响[J]. 核农学报, 2002, 16(4): 232-236.
- [4] 史春余, 王振林, 余松烈. 土壤通气性对甘薯产量的影响及其生理机制[J]. 中国农业科学, 2001, 34(2): 173-178.
- [5] 王树铤, 于作庆. 甘薯在不同土壤条件下高产规律的初步研究[J]. 中国农业科学, 1981 (1): 49-55.
- [6] Kazuyuki W, Toshio K. Effects of the capacity and composition of soil air on the growth and yield of sweet potato plants[J]. Crop Science, 1964, 33(4): 418-422.
- [7] 高 宗, 刘杏兰, 刘存寿, 等. 长期施肥对关中土肥力和作物产量的影响[J]. 西北农业学报, 1992, 1(3): 65-68.
- [8] 杜丽娜, 邵明安, 魏孝荣. 沙质多孔介质中土壤颗粒的迁移[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 49-57.
- [9] 张 娟, 张正斌, 谢惠民, 等. 小麦叶片水分利用效率及相关生理性状的关系研究[J]. 作物学报, 2005, 12(31): 1593-1599.
- [10] 龚吉蕊, 黄永梅, 葛之葳, 等. 4 种杂交杨对土壤水分变化的生态学响应[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 387-396.
- [11] 邵明安, 杨文治, 李玉山. 土壤植物大气连续体中的水流阻力及相对重要性[J]. 水利学报, 1986 (9): 8-14.
- [12] 张喜英. 冬小麦、夏玉米叶水势、蒸腾和液态水流阻力的田间试验研究[J]. 地理学报, 1997, 52(6): 543-549.
- [13] 刘义玲, 李天来, 孙周平, 等. 根际低氧胁迫对网纹甜瓜生长、根呼吸代谢及抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1439-1445.
- [14] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 197-198.
- [15] 张继澍. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 91-92.
- [16] 郭春芳, 孙 云, 陈常颂, 等. 茶树品种光合与水分利用特性比较及聚类分析[J]. 作物学报, 2008, 34(10): 1797-1804.
- [17] 黄明斌, 邵明安. 土壤植物系统中水流阻力的变异性[J]. 土壤学报, 1996, 33(2): 211-216.
- [18] 程建平, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1859-1865.
- [19] 罗永忠, 成自勇. 水分胁迫对紫花苜蓿叶水势、蒸腾速率和气孔导度的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(2): 215-221.

(上接第 19 页)

- [9] 赵军营, 王利军, 牛铁泉, 等. 苹果幼苗部分根系水胁迫对光合作用主要参数的影响[J]. 果树学报, 2005, 22(5): 446-449.
- [10] 梁宗锁, 康绍忠, 高俊风, 等. 分根交替渗透胁迫与脱落酸对玉米根系生长和蒸腾效率的影响[J]. 作物学报, 2000, 26(2): 250-255.
- [11] 卢 军, 邢小军, 朱利泉, 等. 高温干旱共胁迫下外源甜菜碱和 CaCl_2 对烟草生理响应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1437-1443.
- [12] 徐 猛, 马巧荣, 张继涛, 等. 盐胁迫下不同基因型冬小麦渗透及离子的毒害效应[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 0784-0792.
- [13] 姚彩艳. NaCl 和 PEG 胁迫对不同基因型玉米幼苗伤害比较[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
- [14] 龚 明, 李 英, 曹宗巽. 植物体内的钙信使系统[J]. 植物学通报, 1990, 7(3): 19-29.
- [15] 裴 冬, 孙振山, 陈四龙, 等. 水分调亏对冬小麦生理生态的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 68-72.
- [16] 郭 瑞, 郝卫平, 龚道枝. PEG-6000 模拟水分胁迫对不同抗旱性冬小麦生理生态指标的影响[J]. 作物杂志, 2012, 5: 43-47.
- [17] 顾学花, 孙莲强, 张佳蕾, 等. 施钙对干旱胁迫下花生生理特性及产量的影响[J]. 花生学报, 2013, 42(2): 1-8.
- [18] 崔妙玲, 许雪峰, 李天忠, 等. 半根水分胁迫下苹果幼苗根系生长及水分状况研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(8): 355-359.
- [19] 杨根平, 盛宏达, 赵彩霞, 等. 钙素和水分亏缺对大豆幼苗某些生理过程的影响[J]. 西北农业大学学报, 1990, 18(2): 84-87.
- [20] 姜义宝, 崔国文, 李 红. 干旱胁迫下外源钙对苜蓿抗旱相关生理指标的影响[J]. 草业学报, 2005, 14(5): 32-36.
- [21] 王月福, 于振文, 潘庆民, 等. 水分胁迫对冬小麦不同抗旱性品种养分吸收分配和产量的影响[J]. 土壤肥料, 1998, (6): 3-6.
- [22] 王月福, 于振文, 潘庆民, 等. 水分胁迫对耐旱性不同小麦小花分化发育和氮磷及激素含量的影响[J]. 西北植物学报, 2000, 20(1): 38-43.
- [23] 郑青松, 刘海燕, 隆小华. 盐胁迫对油菜幼苗离子吸收和分配的影响[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(1): 65-70.
- [24] 王广恩, 金卫平, 李俊兰, 等. 干旱胁迫下外源钙对棉花幼苗抗旱相关生理指标的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(增刊): 115-118.
- [25] 王玉凤, 王庆祥, 商丽威. 钙对 NaCl 胁迫下玉米幼苗根系活力和有机渗透调节物质含量的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(2): 66-70.