

金沙江干热河谷不同土壤水分对台湾青枣生理生态特性的影响^{*}

薛沛沛¹, 王克勤², 耿养会¹, 李月文¹

(1. 重庆市林业科学研究院森林食品所, 三峡库区森林生态保护与恢复重庆市市级重点实验室, 重庆 400036; 2. 西南林业大学, 昆明 650224)

摘 要: 为了更好地指导金沙江干热河谷地区台湾青枣的种植, 提高产量, 该文研究了 4 种不同土壤水分处理(A, B, C, D 处理的土壤含水率在台湾青枣的全育期分别保持在田间持水量的 40%~55%、55%~70%、70%~85%、85%~100%)对台湾青枣净光合速率和蒸腾速率的影响, 分析了土壤水分和光合速率、土壤水分和蒸腾速率的关系, 计算出不同土壤水分处理的水分利用率, 得出以下结论: (1) 净光合速率的日变化和季节变化均呈现“双峰”曲线, 在土壤含水率为田间持水量的 70%~85% 时达到最大; (2) 蒸腾速率的日变化和季节变化均呈现“双峰”, 随着土壤含水量的增加而增大, 土壤含水率为田间持水量的 85%~100% 时达到最大, 日变化最大值为 $10.95 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 季节变化最大值出现在 6 月, 为 $10.2 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; (3) 水分利用率在土壤含水率为田间持水量的 55%~70% 时达到最大, 日变化最大值出现在 8:00, 为 $7.63 \text{ } \mu\text{mol}/\text{mmol}$, 季节变化平均值为 $1.85 \text{ } \mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。

关键词: 干热河谷; 光合速率; 蒸腾速率; 水分利用效率

中图分类号: S152.7; S665.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)05-0186-04

Effects of Different Soil Moistures on Ecological Physiology Characteristic of *Zizyphus mauritiana* Lam. in Dry-hot River Valley

XUE Pei-pei¹, WANG Ke-qin², GENG Yang-hui¹, LI Yue-wen¹

(1. Forest Food Office of Forestry Research Institute of Chongqing, Protection and Restoration of Forest Ecosystems of Three Gorges Reservoir Area in Chongqing Municipal Key Laboratories, Chongqing 400036, China; 2. Southwestern Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: In order to guide the cultivation of *Zizyphus mauritiana* Lam. in dry-hot river valley, and improve the yield. This essay studied the effects of different soil moistures (A, B, C, D were: rate of soil moisture was 40%~55%, 55%~70%, 70%~85%, 85%~100% of field moisture capacity respectively during the whole period of growth) on photosynthesis rate(P_n) and transpiration rate(Tr) of *Zizyphus mauritiana* Lam. The relationships between soil moisture and P_n , soil moisture and Tr were analyzed, then water use efficiency (WUE) was calculated. The results were gained as follows: (1) The diurnal variation and the seasonal variation of P_n both presented double-peaked curves, and they were highest when rate of soil moisture was 70%~85% of field moisture capacity; (2) The diurnal variation and the seasonal variation of Tr also presented double-peaked curves. They increased as soil moistures increasing, and they were highest when rate of soil moisture was 85%~100% of field moisture capacity. The highest number of diurnal variation was $10.95 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, the highest number of seasonal variation appeared in June, and it was $10.2 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; (3) WUE reached the highest when rate of soil moisture was 55%~70% of field moisture capacity. The highest number arrived at 8:00, was $7.63 \text{ } \mu\text{mol}/\text{mmol}$, the mean number of seasonal variation was $1.85 \text{ } \mu\text{mol}/\text{mmol}$.

Key words: dry-hot river valley; photosynthesis rate; transpiration rate; water use efficiency

* 收稿日期: 2009-03-11

基金项目: 云南省环境科学与工程创新人才培养基地项目(A3003015); 国家重点科研项目(30660037)

作者简介: 薛沛沛(1982-), 女, 河南平顶山人, 工程师, 硕士, 从事森林食品与开发研究工作。E-mail: yunyun44877044@tom.com

在干旱半干旱地区, 由于供水不足, 树木抗旱性的强弱常常是限制其分布和正常生长的主要因素。光合和蒸腾性能对水分响应的变化, 是判断不同树种抗旱性强弱的一条途径。干旱对作物产量和作物生长的影响, 反映在一系列生理生化 and 形态变化上^[1]。而且, 干旱是植物生长的基础, 它是影响植物产量的关键因素^[2]。在作物生物学产量中, 90% ~ 95% 的物质来自光合作用的产物^[3]。关于台湾青枣光合速率和蒸腾速率的研究不多, 还未见报道过。

台湾青枣 (*Zizyphus mauritiana* Lam.), 英文名为 (*Indian jujube* Ber), 为鼠李科 (*Rhamnaceae*) 枣属 (*Ziziphus* Mill) 植物, 为常绿小乔木或大灌木, 被认为是目前极具开发价值的果树之一^[4]。台湾青枣枝干生长快, 容易老化, 需要每年进行更新, 一般采用主枝更新法修剪, 2 月份将主枝留 1.5 m 短截, 剪去两旁侧枝后, 于基部环剥, 剥口下方萌芽只留一枚强壮芽体, 将其所发新梢引缚原主枝上, 形成当年的主枝, 再于其上保留侧枝和结果枝供开花结果。

台湾青枣是金沙江干热河谷种植面积广泛的经济树种之一, 但由于水资源紧缺, 管理粗放, 果实产量不高, 果实品质较差, 而且市场营销等方面也存在不少问题。水分对光合作用的影响比其他气候因子表现得更为突出^[5]。因此对金沙江干热河谷地区台湾青枣的光合和蒸腾特性进行系统研究, 有利于增强果实品质, 提高果实产量。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为 3 a 生的台湾青枣树。

试验于 2005 年 5 月 - 2006 年 1 月在金沙江干热河谷元谋县水保办扫碱箐苗圃基地进行。采取完全随机设计试验方法, 选取相同质地土壤上生长的同一品种的 36 株 3 a 生台湾青枣树, 所选取的台湾青枣树的种植间距 3 m × 4 m, 树冠间距保持 50 cm, 生长无显著差异, 具有普遍的代表性。

1.2 试验处理方法

试验进行 4 种不同的土壤水分处理, 每种处理有 9 株, 每种处理设 3 个平行处理重复, 进行土壤含水率控制, 土壤含水率以田间持水量为基准, 使第一种 (记为 A)、第二种 (记为 B)、第三种 (记为 C)、第四种 (记为 D) 处理的土壤含水率在台湾青枣的全育期分别保持在田间持水量的 40% ~ 55%, 55% ~ 70%, 70% ~ 85%, 85% ~ 100%。田间持水量采用环刀法于试验地取样测得为 33%。因此, 试验设定的 4 个土壤水分含量为: 13.2% ~ 18.15%, 18.15%

~ 23.1%, 23.1% ~ 28.05%, 28.05% ~ 33%。

土壤含水量的测定方法: 从开始进行水分处理的时间起, 每天用土壤烘干称重法测定土壤含水率, 当土壤含水率达到设定的田间持水量时, 记录时间。经测定, 分别为 9 d、6 d、4 d 和 2 d 浇水一次, 在不同的季节和生长阶段有少许调整。

1.3 生理生态特性测定方法

对选取的 36 株台湾青枣树, 经过不同的水分处理, 选向阳枝条的中位叶进行光合测定, 于天气晴朗日, 从 8:00 - 18:00 每隔 2 h 测定 1 次, 共测 6 次, 求取平均值^[6]。测定是在 2005 年 5 月 - 2006 年 1 月水分处理期间进行, 用光合气体分析系统 (LI-6400, LI-COR, Lincoln, NE) 每月测定一次。同时测定净光合速率和蒸腾速率。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水分对净光合速率的影响

2.1.1 光合速率日变化 日变化是作物生产过程中物质积累与生理代谢的基本单元, 也是分析环境因素作物生长和代谢的重要手段。植物叶片光合速率的日变化, 根据植物的种类, 有正规曲线型和中午降低型两种类型; 由于天气的变化和植株的繁茂程度, 产生了变动型和平坦型两种类型^[7]。

由图 1 可以看出: ① P_n 的日变化曲线是典型的“双峰”曲线。即在 8:00 时光强较弱, P_n 比较低, 之后随着光照的增强光合作用不断提高, 到 12:00 达到最高峰, 16:00 又出现次高峰。两峰值间的低谷就是人们常说的“午休”或净光合速率中午降低现象^[3-5]。很多植物 P_n 的最高峰值出现在 10:00 - 11:00, 但台湾青枣树叶片 P_n 日变化的最高峰值出现在 12:00, 经研究表明这是因为测定当天早上云层较厚, 10:00 - 11:00 时光合有效辐射较低, 而到 12:00 时天气转晴光合有效辐射增加到 1 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上, P_n 也增加到了一天中的最高值。② C 处理最高峰值为 29.85 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 与 B 处理的最大峰值 27.99 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 相差不大。而 A 处理的最高峰值仅为 17.09 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 比 C 处理的 P_n 降低了 42.75%。③ A 处理 P_n 日平均值为 11.71 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; C 处理 P_n 日平均值达到 19.62 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 相当于前者的 1.68 倍。④ 当水分供应充足时, P_n 随着水分的继续增加而逐渐下降, 日平均值下降剧烈, 这可能是由水分过量造成的。在 D 处理时, 光合速率日平均值为 10.73 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 比 C 处理的 P_n 日平均值降低了 45.31% (见图 1)。

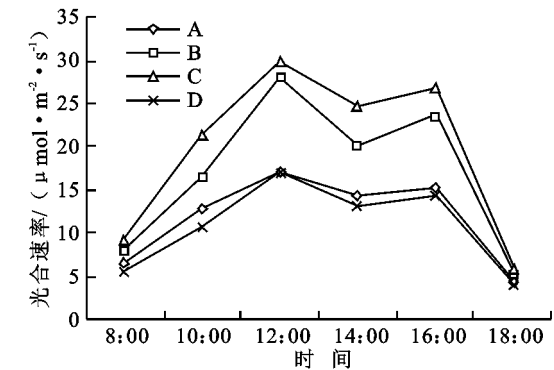


图 1 不同土壤水分下叶片净光合速率的日变化

2.1.2 光合速率季节变化 经调查台湾青枣树净光合速率的季节变化具有以下特征: ①净光合速率的季节变化表现为明显的“双峰”曲线, 两次峰值出现在生长发育最旺盛的 6 月和 9 月, 6 月的最高峰值大于 9 月的次高峰值。4 种不同土壤水分处理的最高峰值分别为 A 处理 $11.71 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、B 处理 $16.9 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、C 处理 $19.62 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、D 处理 $10.73 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。次高峰值分别为 A 处理 $9.05 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、B 处理 $11.59 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、C 处理 $13.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、D 处理 $7.78 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。②在台湾青枣树生长的初期和末期, 净光合速率较小。而且, 次高峰值之后, 净光合速率一直处于降低的状态。③土壤含水量在田间持水量 40%~85% 的范围内, 叶片的光合速率均随着土壤含水量的减少而降低, 且 C 处理光合速率高于 A、B 处理。其中, 以 C 处理的净光合速率最高, 但其数值与 B 处理的值相差不大。随着土壤含水量的继续增加, 光合速率急剧下降, D 处理的最高峰值比 C 处理降低了 45.31%, 比 B 处理降低了 36.51%, 比 A 处理降低了 8.37% (见图 2)。

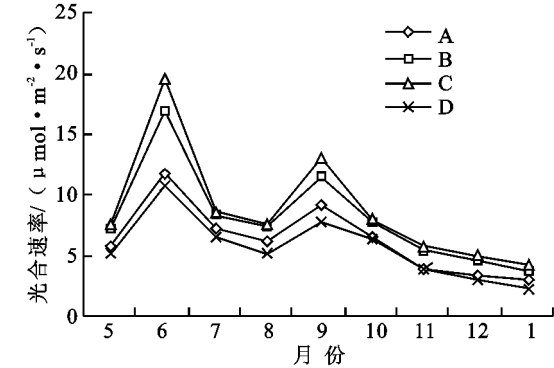


图 2 不同土壤水分下叶片净光合速率的季节变化

2.2 不同土壤水分对蒸腾速率的影响

2.2.1 蒸腾速率日变化 植物蒸腾是植物调节体内水分平衡的主要环节, 由于外界环境条件随季节的节律性变化和气孔运动机制的影响, 环境条件在一天内的日变化规律, 使蒸腾速率的日变化也表现

出明显的节律性。不同土壤水分条件下蒸腾速率的日变化相差很大^[8]。由图 3 看出: ①在不同土壤水分条件下都表现出“双峰”曲线的特点。第一次高峰出现在 12:00, 第二次高峰出现在 16:00, 有明显的“午休”现象。②当土壤含水率从田间持水量的 40%~55% 上升到 85%~100%, 蒸腾速率的最小值从 $0.98 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增加到 $1.3 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 高峰值也从 $7.38 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增加到 $10.95 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 而且, 蒸腾速率一直处于升高状态, 直至达到最大值。随着水分的增加, 蒸腾速率也增加, 不利于水分利用率的提高, 也不利于节约水资源。

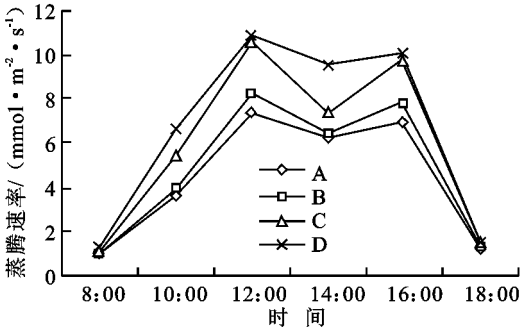


图 3 不同土壤水分下叶片蒸腾速率的日变化

2.2.2 蒸腾速率季节变化 由图 4 看出: ①随季节的变化, 不同土壤水分处理的台湾青枣树的蒸腾速率季节变化趋势为“双峰”曲线。5~6 月随气温升高, 降雨逐渐增多, 土壤水分增大, 蒸腾速率达到了最高峰值。4 种不同的水分处理的最高峰值分别为 A 处理 $7.02 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、B 处理 $7.81 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、C 处理 $9.53 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、D 处理 $10.2 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 7 月, 降雨量比较少, 蒸腾速率相应降低; 8~9 月降雨量逐渐增多, 土壤含水率较高, 蒸腾速率开始上升, 9 月份达到第二次高峰, 次高峰值分别为 A 处理 $4.8 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、B 处理 $5.03 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、C 处理 $6.78 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、D 处理 $7.29 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 11 月份到次年 1 月份, 降雨量下降, 气温较低, 台湾青枣果实成熟, 树木生长比较迟缓, 为此蒸腾速率下降较快并降到最低点, 此时四种不同水分处理的台湾青枣的最低蒸腾速率分别为 A 处理 $1.41 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、B 处理 $1.6 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、C 处理 $1.82 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、D 处理 $1.35 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。②台湾青枣树的蒸腾速率与土壤水分呈正相关关系, 即随着土壤含水量的增加, 蒸腾速率也相应增大 (见图 4)。

2.3 不同土壤水分对水分利用率的影响

研究表明^[9], 植物叶片水分利用效率在弱光下比强光下高, 就是由于弱光下随光强的增强光合速率的增加比蒸腾速率增加幅度快, 而强光下随光强的增强, 蒸腾速率的增加幅度比光合速率的增加幅度快。

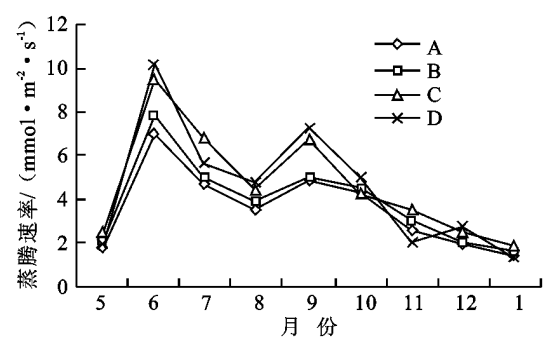


图 4 不同土壤水分下叶片蒸腾速率的季节变化

2.3.1 水分利用率的日变化 由于 P_n 和 T_r 在一天中随日照和气温表现出有规律的日变化, 由两者决定的 WUE 也具有典型的日变化规律。从图 5 可以看出, 不同土壤水分条件下的水分利用率 (WUE) 都是在 8:00 时达到最高值, 然后急剧下降, 在 10:00–16:00 之间都较低, 到下午 18:00 时又稍有回升。

①早晨 8:00 左右, 温度较低, P_n 和 T_r 都还没有开始上升, 都处于较小的状态, 但 WUE 在这时却出现了最高峰值。10:00–16:00, 温度大幅度上升, 光合速率在不断增长的同时, 蒸腾速率也急剧提高, 因此中午有长达 5~6 h 的时间 WUE 都很低, 1.37

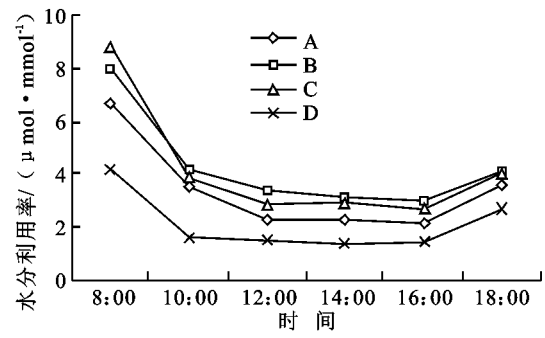


图 5 不同土壤水分下叶片水分利用率的日变化

3 结论与讨论

植物的光合速率、蒸腾速率受到很多因子的影响, 如光照、温度、水分等, 但在干旱地区, 水分是植物生长的最大限制因素^[10]。光合速率、蒸腾速率在台湾青枣生长的全部时期表现出明显的日变化和季节变化, 这种变化因植物种类、生长状态和环境因子的不同而异。WUE 描述的是植物产量与消耗水量之间的关系^[11], 表示植物对水分的利用水平。研究结果表明, 适度的水分亏缺有助于提高树木的光合能力和 WUE^[12]。

本研究表明, 不同土壤水分处理的台湾青枣树, 当土壤含水率为田间持水量的 40%~85%, 叶片的光合速率随水分的增加大幅度上升, 在土壤含水率为田间持水量的 70%~85% 时达到最大值, 而当土壤含水量继续增长时, 光合速率则开始降低; 蒸腾速率却随

~4.14 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。不同水分处理 WUE 的日变化幅度较大, WUE 最高值与最低值日较差为 7.42 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。

②WUE 的最大值出现在早上 8:00, 而且此时的最大值随着 SWC 的上升而不断变化。当土壤含水率从田间持水量的 40%~55% 上升到 55%~70% 时, WUE 从 6.65 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 上升到 8.01 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$, 当土壤含水率从田间持水量的 55%~70% 上升到 70%~85% 时, WUE 继续上升到 8.79 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$, 然而, 当土壤含水量继续则增高, 水分利用率却呈下降的趋势。

2.3.2 水分利用率的季节变化 台湾青枣树的 WUE 表现出下列特点: ①水分利用效率白天平均值变化范围 3.51~1.20 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。四种不同水分处理的最大值均出现在 5 月, 以 B 处理的 WUE 最大值为 3.51 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。②6–7 月, WUE 的日平均值和日较差在波动中呈下降趋势, 8–10 月比较稳定, 有很小幅度的回升, 11 月又下降, 之后又有回升。③总体来看, 在台湾青枣的整个生长季, 以 B 处理的水分利用率最大 (见图 6)。

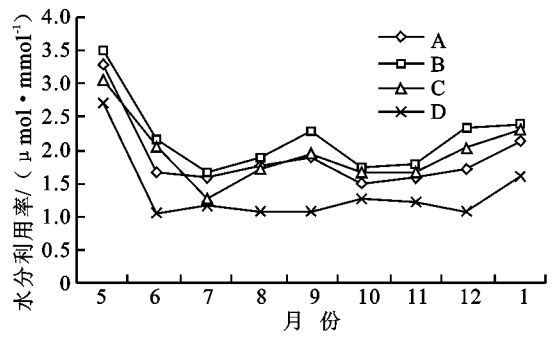


图 6 不同土壤水分下水分利用效率的季节变化

着土壤含水量的增加而不断增大, 在土壤含水率为田间持水量的 85%~100% 时达到最大值。然而, 蒸腾速率的增加必然导致植物叶片 WUE 值的变化, 因此, 不同土壤水分处理的台湾青枣的 WUE 以土壤含水率为田间持水量的 55%~70% 时最大。可见台湾青枣树对水分胁迫有一定的适应能力。

比较不同土壤水分条件下台湾青枣叶片的生理生态特性得出: 在土壤含水量高时台湾青枣 P_n 升高, 但蒸腾速率也明显增大。在土壤含水量较低时, 光合速率下降较小, 但蒸腾速率明显减小, 水分利用效率显著提高。这表明高的土壤水分显著增大了台湾青枣的蒸腾强度, 适度干旱有利于提高台湾青枣的水分利用效率。台湾青枣作为主要经济树种之一, 在金沙江干热河谷地区具有较好的发展前景。本研究为水资源紧张的干旱地区的台湾青枣灌溉提供一定的理论依据。

植被覆盖下的坡面之间铵态氮的变化幅度不如硝态氮明显。

3 结 论

不同植被下土壤中碱解 N 含量的变化和全氮的变化基本相同, 其基本变化趋势为: 刺槐地土壤> 柠条> 芨芨, 只是全氮的变化幅度更大一些。由于硝态氮和铵态氮的损失途径不同, 在不同的植被覆盖下, 芨芨覆盖度要明显比刺槐和柠条大, 所以降水与土壤的作用时间也就会较长, 这就有利于硝态氮的淋溶。所以, 芨芨覆盖下的硝态氮含量明显少于刺槐和柠条; 同时, 铵态氮不易淋溶再加上植株矮小的芨芨的截留作用致使铵态氮的流失要比硝态氮的流失小的多。

全氮和硝态氮在同种植被覆盖下沿坡面变化有相似之处, 芨芨和柠条覆盖下全氮和硝态氮的变化趋势为坡下> 坡上> 坡中, 铵态氮变化总的趋势仍然是坡的中间部分较低, 坡上和坡下较高, 刺槐例外, 原因还是跟刺槐共生的草类的拦截作用有关。但是在同一种植物覆盖下变化的幅度没有硝态氮和全氮的变化趋势那么明显; 而且, 在不同的植物覆盖下的坡间差别也不是很明显, 甚至出现了交叉的现象。

由刺槐的变化可以看出林草结合在防止氮素流失和提高土壤的氮素富集上要比单独一种植被覆盖强得多, 所以在防止氮素养分流失时可以提倡林草结合的方式。

参考文献:

[1] 郑剑英, 吴瑞俊, 翟连宁, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤养分的分布特征[J]. 水土保持通报, 1996, 16(4): 26-30.

[2] 王国梁, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2001, 22(1): 1-5.

[3] 张兴昌, 邵明安. 植被覆盖度对流域有机质和氮素径流流失的影响[J]. 草地学报, 2000, 8(3): 198-203.

[4] 张兴昌, 邵明安. 黄土丘陵区小流域土壤氮素流失规律[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 617-626.

[5] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域地图集[M]. 上海: 中国地图出版社, 1987.

[6] 傅伯杰. 黄土丘陵区土地利用结构对土壤养分分布的影响[J]. 科学通报, 1998, 43(22): 25-29.

[7] 王百群, 刘国彬. 黄土丘陵区地形对坡地土壤养分流失的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 18-22.

[8] 王百群, 刘国彬. 黄土丘陵区坡地土壤养分及其生产力的空间变异性[J]. 水土保持通报, 2000, 20(7): 70-73.

[9] Mc Claugherty S A. The Role of Fine Roots in the Organic Matter and Nitrogen Budgets of Two Forested Ecosystems. Ecology, 1982, 63(5): 1481-1490.

[10] 王晗生, 刘国彬. 植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(2): 62-68.

[11] 张兴昌, 邵明安, 付会芳, 等. 多年生黑麦草草地矿质氮淋溶与径流流失的关系[J]. 草地学报, 2000, 8(2): 82-87.

[12] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 55-58.

[13] Vogt K. Nitrate leaching in soils after sludge application[M]//Bledsoe C S. Municipal sludge application to pacific northwest forest lands. Inst. Univ. Washington, Seattle, 1981: 59-66.

[14] 杨林, 薛栋森, Henry C L, 等. 生物固体对土壤氮循环和硝态氮淋洗的影响[J]. 农业环境保护, 1997, 16(4): 182-186.

(上接第 189 页)

参考文献:

[1] 山仑. 植物水分利用效率和半干旱地区农业用水[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(1): 61-66.

[2] 张锋, 王建华, 余松烈, 等. 白首乌光合日变化的研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(2): 288-292.

[3] 杜维广, 张桂如. 大豆光合作用与产量关系研究[J]. 大豆科学, 1999, 18(2): 154-158.

[4] 张朝坤. 印度枣栽培技术初探[J]. 西南园艺, 2000, 28(2): 10.

[5] 葛滢, 常杰, 陈增鸿, 等. 青冈净光合速率与环境因子的关系[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 683-688.

[6] 谢田玲, 沈禹颖, 邵新庆, 等. 黄土高原 4 种豆科牧草的净光合速率和蒸腾速率日动态及水分利用效率[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1679-1687.

[7] 户刘义次[日]. 作物的光合作用与物质生产[M]. 薛德容, 译. 北京: 科学出版社, 1979: 233-234.

[8] 王克勤. 集水造林与水分生态[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 232-250.

[9] Saeed L A M, EL-Nadi A H. Irrigation effects on the growth, yield and water use efficiency of alfalfa[J]. Irrigation Science, 1997, 17(2): 63-68.

[10] 严巧娣, 苏培玺. 不同土壤水分条件下葡萄叶片光合特性的比较[J]. 西北植物学报, 2005, 25(8): 1601-1606.

[11] Kramer P J, Kozlowski T T. Physiology of Woody Plants[J]. London: Academic Press, 1979: 443-444.

[12] 姬兰柱, 肖冬梅, 王森. 模拟水分胁迫对水曲柳光合速率及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 408-412.