

黄土丘陵区金矮生苹果园土壤水分 有效性及生产力分级

周泽福^{1,2}, 刘致远³, 张光灿⁴

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2 国家林业局林木培育实验室, 北京 100091;
3. 山西省吕梁山森林经营局车鸣峪林场, 山西 吕梁, 033400; 4 山东农业大学林学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 在半干旱黄土高原丘陵沟壑区, 采用 Li-Cor6200 便携式光合仪和 Li-Cor1600 便携式稳态气孔计, 对 9 年生金矮生苹果树的净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和气孔限制值与土壤水分的定量关系进行了研究; 以光合作用生理参数为指标对苹果园土壤水分有效性及生产力进行了分级与评价。结果表明: 苹果园的土壤相对含水量在 21.5% 以下为“无效水”; 21.5%~46.5% 为“低产低效水”; 46.5%~65.0% 为“中产高效水”; 65.0%~75.0% 为“高产中效水”; 75.0%~79.0% 为“中产低效水”; 79.0% 以上也属于“低产低效水”。依据干旱与半干旱地区农林业生产以提高水分利用效率为核心的土壤水分管理思想, 确定金矮生苹果园适宜的土壤相对含水量为 46.5%~65.0%; 最佳土壤相对含水量为 65.0% 左右, 此土壤水分可使苹果树达到获得高产高效的生产水平, 称之为“高产高效水”。

关键词: 黄土丘陵区; 金矮生苹果; 土壤水分生产力; 土壤水分有效性

中图分类号: S727.3 文献标识码: A

Grading of Soil Moisture Availability and Its Productivity on Goldspur Apple Orchard in Loess Hilly-Gully Region

ZHOU Zefu^{1,2}, LIU Zhi-yuan³, ZHANG Guang-can⁴

(1. Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091 China; 2. Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China;
3. Che Mingyu Forest Farm, Forestry Management Bureau of Liliang Mountain Shanxi Province, Liliang 033400, Shanxi, China;
4. Shandong Agricultural University, Taian 271018, Shandong, China)

Abstract: With Li-Cor6200 photosynthesis determination system and Li-Cor1600 steady poremeter, the quantitative relationship between soil water content (SWC) and net photosynthesis rate, transpiration rate (T_r), water use efficiency, stomatic conductance (g_s), intercellular CO₂ concentration (C_i) and stomatal limitation (L_s) in leaves of nine-year old goldspur apple (*Malus pumila* cv. Goldspur) trees were studied, in semi-arid area on Loess hilly-gully region. Based on this, the soil water availability and its productivity of test apple orchard were graded and evaluated. The results showed that the soil relative content less than 21.5% belonged to “non-available water”; in the range of 21.5%~46.5%, “low productivity and low efficiency water”; 46.5%~65.0%, “middle productivity and high efficiency water”; 65.0%~75.0%, “high productivity and middle efficiency water”; 75.0%~79.0%, “middle productivity and low efficiency water”; and more than 79.0%, “low productivity and low efficiency water”. According to the essential aim of agriculture and forestry production to enhance water use efficiency in arid and semi-arid regions, the regulation criterion of soil relative content of apple orchard was ascertained as suitable range 46.5%~65.0% (in the range of “middle productivity and high efficiency water”) and the optimum 65.0% that belonged to “high productivity and high efficiency water”.

Key words: Loess hilly-gully region; Goldspur apple; soil water productivity; soil water availability

干旱缺水是制约植被恢复与农林业生产最关键的生态因子,随着水资源危机和干旱危害的不断加剧,在我国广大的北方地区,节水农林业生产模式的发展日益被重视^[1,2]。节水农林业的核心问题与最终目标是提高降水与灌溉水的利用效率,用水有效性无疑成为判别节水效果与潜力的重要指标,通常用水分利用效率指标衡量^[3]。植物光合作用与水分代谢及其生理生态机理是节水农林业重要的理论基础,如何调控土壤水分,在最大限度减少用水的前提下,形成植物产量和水分利用效率的最佳组合,这是我国现阶段节水灌溉研究的热点和难点^[4,5]。苹果在我国北方地区的农林业发展和果树生产中占有重要地位。近年来,虽然在节水栽培技术及其生理和生长效应方面的研究取得了一些成果^[6,7],但与农作物相比,有关节水灌溉的生理生态机制研究,尤其是光合作用与土壤水分关系的研究还处于起步阶段^[6]。已有的报道^[8~11]大都是盆栽试验的结果且缺乏多级水分胁迫梯度的观测,应用于指导实际生产受到较大限制。因此,需要进一步在田间环境条件下,进一步探索促进光合作用和提高水分利用效率的土壤水分供给水平(适度水分胁迫程度)及其有效性和生产力水平。有关土壤水分有效性的研究在农作物上较多^[11~13],早期研究所形成的观念可概括为等效学说^[14]和非等效学说^[15]。近年来,随着SPAC(Soil-Plant Atmosphere Continuum) 理论^[16]的发展以及水分运动测定技术的进步^[17,18],已开始利用植物根系吸水函数的全新观念和方法来研究土壤水分有效性^[17~21],但到目前为止,由于研究方法和评判标准互不相同,研究结论并不一致,实质上,土壤水分有效性与土壤供水特征、植物生理生态特性和气象条件有关^[12]。目前,关于黄土高原土壤水分有效性的研究较多^[18,20,22,23],但都没有与植物生长及其生理生态研究相结合,不能确切地定量描述植物生长、生产与水分利用的关系,关于黄土区苹果园土壤水分有效性问题的研究未见报道。本文以黄土丘陵沟壑区苹果园9年生的金矮生苹果树(*Malus pumila* cv. Goldspur)为研究对象,通过测定其光合作用生理参数与土壤水分的定量关系,尝试利用植物水分生理学原理提出以光合速率和水分利用效率为指标的土壤水分有效性与生产力分级标准,以期为苹果树的旱作栽培与节水灌溉的田间水分管理提供理论依据和技术标准。

1 试验地概况

试验地设在山西省中阳县的圪针儿流域(面积为958 hm²),地处典型的黄土高原丘陵沟壑区,行政隶属于山西省西部吕梁地区。地理位置 37° 09' 51" ~ 37° 11' 58" N, 110° 58' 41" ~ 111° 01' 55" E。试验区海拔 1400~1600 m,属于暖温带半干旱大陆性季风气候,年平均降水量 518.6 mm,但年内分配不均,7—9月降水占全年的70%以上。年平均蒸发量达 1019.7 mm,4—6月的蒸发量最大,春旱严重。年平均气温 8.0 °C,极端最高气温 35.6 °C,极端最低气温 -24.3 °C,年无霜期 143 d, ≥10 °C的年积温 3100~3200 °C。该区属于森林草原灌丛植被区,土壤为黄绵土,质地以轻壤土为主, pH 值 8.0~8.4。

2 研究方法

2.1 试验设置

在苹果园中选取生长健壮 9 年生金矮生苹果树(平均高 3.3 m, 平均冠幅 3.1 m) 15 株,将其分为 5 组(每 3 株为 1 组)处理,在每株附近(离树干约 0.5 m 处)各埋设 1 根长度为 1 m 的土壤中子水分仪测定铝管。通过人为给水和自然蒸发耗水产生多级土壤水分梯度,其中 1 组为对照,不供水。在试验观测前 2 d,用水桶分别给各组处理的植株不同的灌水量(用土壤中子水分仪监测土壤含水量的变化),2 d 后获得初期水分梯度,开始第 1 次观测。然后每隔 3 d 通过自然蒸发耗水进一步产生连续变化的土壤水分梯度(胁迫程度)后,再进行第 2 次和第 3 次测定。用环刀法测定试验地土壤密度和田间持水量。

2.2 观测方法与数据处理

用 Li-Cor 6200(U. S. A) 便携式光合仪测定光合作用参数。叶片净光合速率(P_n ; $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间 CO₂ 浓度(C_i ; $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)、气孔导度(g_s ; $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)等由光合仪直接输出;蒸腾速率(T_r ; $\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)采用 Li-Cor 1600(U. S. A) 便携式稳态气孔计测定(与光合作用观测同步进行);气孔限制值(L_s ; %)和叶片瞬时水分利用效率(WUE ; $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)由公式(1)和(2)计算。

$$L_s = 1 - C_i / C_a^{[24]} \quad (1)$$

$$WUE = P_n / T_r^{[1]} \quad (2)$$

每次测定时分别在树冠南、北方向的中部各选取 5 个正常叶片,并做好标记,在不同时间观测时皆用同一叶片,仪器设定 3 次重复读数。第 1 次测定在人工

给水 48 h 后进行,以后每隔 3 d 分别进行第 2 次和第 3 次观测。3 次观测均为晴天(1999 年 6 月 12、16、20 日),具体时间为 9:00—11:00。用 LNW-50A 型土壤中子水分仪测定土壤含水量($g \cdot kg^{-1}$),与光合作用、蒸腾作用观测同日进行,观测深度为 0~100 cm(每 20 cm 为 1 层,取平均值)。土壤相对含水量(%)为土壤水分含量与田间持水量($g \cdot kg^{-1}$)的比值。

应用 SPSS 软件对数据进行统计计算和分析。

3 结果与分析

3.1 光合生理参数与土壤水分的关系

3.1.1 净光合速率和蒸腾速率对土壤水分的响应

由图 1A、B 可以看出,随着土壤相对含水量的增加,苹果叶片净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)上升较快,当土壤相对含水量增加到一定临界值以后,叶片净光合速率和蒸腾速率由上升变为下降,表现为对土壤水分具有明显的阈值反应。土壤相对含水量大约在 58.1%~83.7%,叶片净光合速率和蒸腾速率相对稳定在较高水平上,并不随土壤相对含水量的增加而明显变化,表明此土壤水分阈值对叶片净光合速率和蒸腾速率具有较高的和基本相同的有效性。由此可确定出土壤水分对叶片净光合速率有效性的两个临界值,即维持最高叶片净光合速率的土壤相对含水量临界值(记为 $RWC_{P_n=\max}$)为 74.9% 和叶片净光合速率为零时的土壤相对含水量临界值,即光合作用的土壤相对含水量补偿点为 21.5% (记为 $RWC_{P_n=0}$),这表明土壤水分相对含量为 75% 左右时,苹果叶片光合作用的有效性最高,而土壤相对含水量小于 21.5% 时,则对苹果叶片的光合作用无效。同样,蒸腾速率最高时的土壤相对含水量临界值(记为 $RWC_{T_r=\max}$)为 78.6%,即土壤相对含水量为 79% 左右时,土壤水分对苹果叶片蒸腾作用的有效性最高。

3.1.2 叶片水分利用效率对土壤水分的响应 叶片水分利用效率取决于叶片净光合速率与蒸腾速率的比值,是描述植物物质生产与水分消耗之间关系的重要综合指标。从图 1C 可以看出,随着土壤相对含水量的增加,叶片水分利用效率表现出近似“S”形的变化规律:即土壤相对含水量约小于 48.8% 时,叶片的水分利用效率增加较快;土壤相对含水量为 48.8%~72.1% 时,叶片的水分利用效率一直维持较高的水平而且变化不大,表明此土壤水分阈值对叶片水分利用效率具有较高的和基本相同的有效性,其中叶片水分利用效率最高时的土壤相对含水

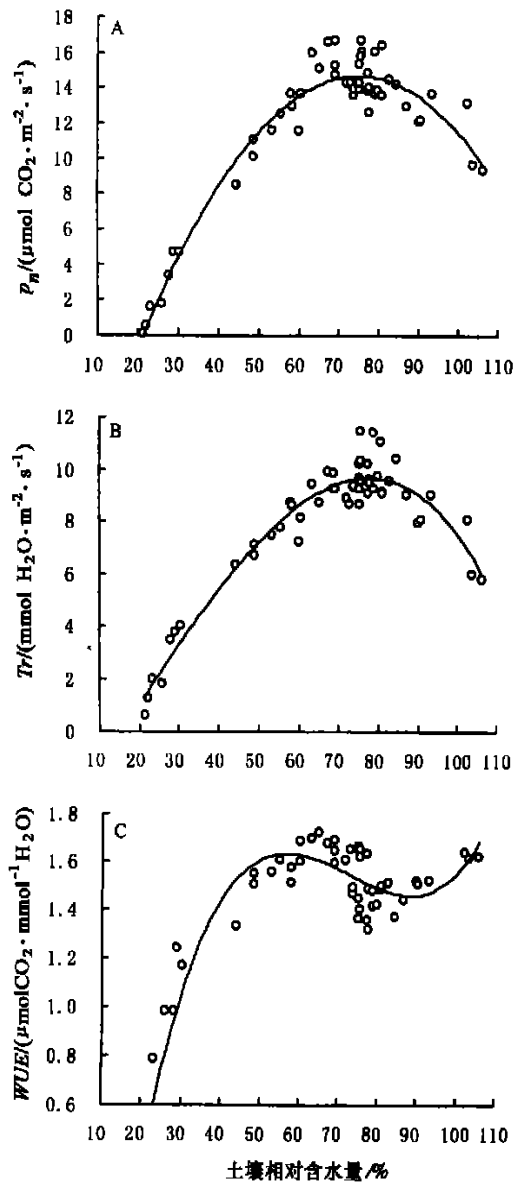


图 1 苹果叶片的 P_n 、 T_r 和 WUE 对土壤水分 (RWC) 的响应 P_n : 净光合速率; T_r : 蒸腾速率; WUE : 叶片水分利用效率; RWC : 土壤相对含水量

量(记为 $RWC_{WUE=\max}$)约为 65.1%;而土壤相对含水量大于 72.1% 时,叶片水分利用效率随土壤相对含水量的增加反而下降,当土壤相对含水量大约为 77.7% 时,叶片的水分利用效率出现较小值,此时的土壤相对含水量与蒸腾速率最高时的土壤相对含水量(78.6%)基本相同。上述研究结果表明:土壤相对含水量大于 72% 时,虽然有利于苹果叶片净光合速率和产量的提高,但同时导致很高的蒸腾速率使水分消耗量较大,不利于叶片水分利用效率的提高,这显然不符合干旱地区农林业以高效利用水资源为目标的土壤水分管理标准。

3.1.3 气孔导度、气孔限制值和胞间 CO₂ 浓度对土壤水分的响应 叶片气孔导度、气孔限制值和胞间 CO₂ 浓度对不同阈值的土壤水分具有不同的响应规律(图 2)。土壤相对含水量约为 46.5%~74.4% 时,随着土壤相对含水量的降低, g_s 和 C_i 明显下降(图 2A、C),但 L_s 明显上升(图 2B)。当土壤相对含水量小于 46.5% 时,随着土壤相对含水量的降低, g_s 和 L_s 明显下降(图 2A、B),但 C_i 显著上升(图 2C)。根据光合作用的气孔与非气孔限制理论^[25],可以断定,随着土壤水分胁迫的加剧,苹果叶片净光合速率下降(图 1A)的主要原因是气孔因素向非气孔因素

转变,发生转变的土壤相对含水量大约为 46.5%(记为 $RWC_{P_n = S^{-1}nS}$)。

光合作用的气孔限制理论认为,植物受旱后,随着水分亏缺的加剧,光合作用受抑制的主要原因都有从气孔因素向非气孔因素转变的过程,其转变时间因植物种类及其抗旱能力,水分胁迫程度及施加方式等因素而异,但对不同植物种而言,导致这一转变的确切的土壤水分临界值还不十分清楚。本研究结果表明:在自然干旱条件下,当土壤相对含水量小于 46.5% 时,叶片净光合速率下降的主要原因是气孔因素转变为非气孔因素(图 2A、2B 和 2C),表明苹果叶片光合机制受到破坏,若土壤水分进一步降低会使叶子变黄,甚至落叶,叶片水分利用效率和光合生产力严重下降。由此认为,土壤相对含水量小于 46.5% 是半干旱黄土丘陵地区苹果节水灌溉所允许的土壤水分的最大亏缺程度,这与维持较高叶片水分利用效率的土壤水分下限(土壤相对含水量为 48.8% 左右)比较接近(图 1C)。

3.2 土壤水分有效性及其生产力分级与评价

通过 3.1 的分析,确定出对金矮生苹果不同光合生理参数具有最高和最低有效性的土壤水分临界值(表 1)。将各个土壤水分临界值作为分界点,对土壤水分进行阈值划分,提出以光合作用生理参数为标准的苹果园土壤水分有效性及生产力分级表(表 2)。

表 1 对金矮生苹果光合参数具有最高和最低有效性的土壤水分临界值

| 光合生理参数 临界值 | 土壤含水量临界值 | |
|------------------|---------------------------------------|-------------------|
| | 质量含水量(MWC) / (g·kg ⁻¹) | 相对含水量(RWC) / % |
| $P_n = 0$ | 46 | 21.5 |
| $P_n = S^{-1}nS$ | 100 | 46.5 |
| $WUE = Max$ | 140 | 65.0 |
| $P_n = Max$ | 161 | 75.0 |
| $T_r = Max$ | 169 | 79.0 |

表 2 金矮生苹果园土壤水分有效性及生产力分级

| 项目 | 土壤含水量阈值 | |
|-------|---------------------------------------|--------------------------|
| | 质量含水量(MWC) / (g·kg ⁻¹) | 相对含水量(RWC) / % |
| 无产无效水 | < 46 | < 21.5 |
| 低产低效水 | 46~ 100 | 21.5~ 46.5 |
| 中产高效水 | 100~ 140 ^① | 46.5~ 65.0 ^① |
| 高产中效水 | 140 ^① ~ 161 | 65.0 ^① ~ 75.0 |
| 中产低效水 | 161~ 169 ^① | 75.0~ 79.0 |
| 低产低效水 | > 169 | > 79.0 |

注: ①金矮生苹果园最佳土壤含水量(MWC ≈ 140 g·kg⁻¹, RWC ≈ 65%)称之为“高产高效水”。

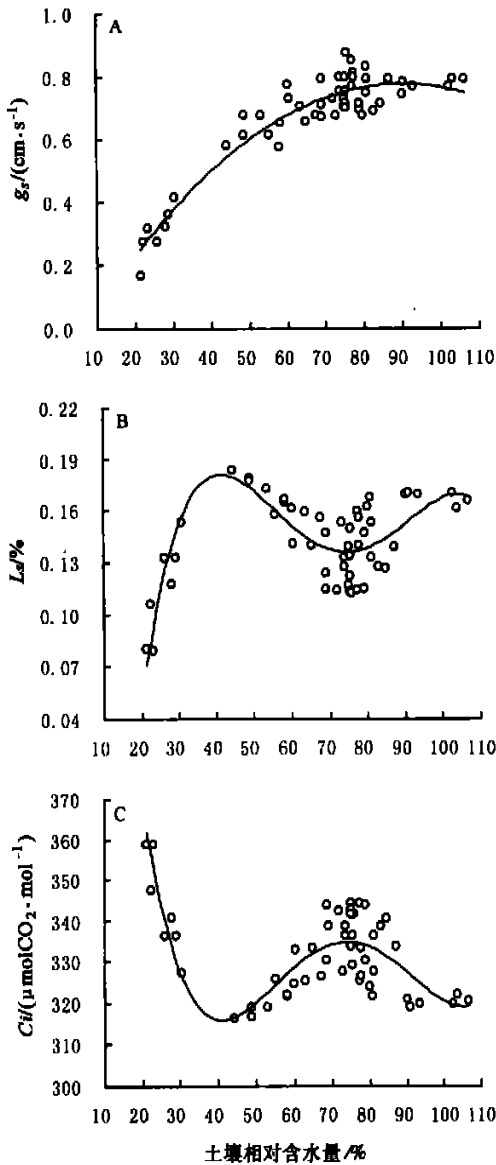


图 2 苹果叶片的 C_i 、 L_s 和 g_s 对土壤水分(RWC)的响应 C_i : 胞间 CO₂ 浓度; L_s : 气孔限制值; g_s : 气孔导度; RWC: 土壤相对含水量

此分级标准是建立在植物水分生理学基础上,与植物生理过程对土壤水分的响应密切结合,各土壤水分临界值的生理意义明确。用“产”表示光合速率和“效”表示水分利用效率代替了以往研究中“效(根系吸水难易)”的概念,赋予“产”和“效”更加明确的生理意义。以光合作用的土壤水分补偿点(叶片净光合速率为零时的土壤含水量)代替“凋萎湿度”,使其生理意义也更加明确。例如“高产”和“中效”是指净光合速率高和水分利用效率中等,“中产”和“中效”指中等以上(或较高)的净光合速率和水分利用效率,而“无产”和“无效”意味着净光合速率和水分利用效率为零(或负值)。

在土壤质量含水量低于 $46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤相对含水量低于 21.5%) 时,净光合速率和水分利用效率为零,不能形成生产力,土壤水分不能被有效利用,故称之为“无产无效水”。土壤质量含水量为 $46 \sim 100 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤相对含水量在 21.5% ~ 46.5%) 时,净光合速率和水分利用效率都很低,净光合速率小于其最高水平 ($16.7 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 的 50%、水分利用效率小于其最高水平 ($1.7 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) 的 60%,并随土壤含水量的降低急剧减小(图 1A、C);当土壤质量含水量高于 $169 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤相对含水量高于 79.0%) 后,净光合速率和水分利用效率也比较低,净光合速率小于其最高水平的 70%、水分利用效率小于其最高水平的 75%,并随土壤含水量的增加明显减小,故将其都称之为“低产低效水”。土壤质量含水量在 $100 \sim 140 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤相对含水量在 46.5% ~ 65.0%) 时,净光合速率较高,达到叶片最高净光合速率 ($16.7 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 的 60% ~ 80%,并随土壤含水量的增加而提高,能获得中度以上的光合生产力水平,而水分利用效率达到最高水平,故称其为“中产高效水”;土壤质量含水量在 $140 \sim 161 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤相对含水量在 65.0% ~ 75.0%) 时,净光合速率达到最高水平,能获得最高的光合生产力,而水分利用效率也较高,能达到叶片最高水分利用效率 ($1.7 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) 的 75% 以上(中度以上的叶片水分利用效率),故称其为“高产中效水”;土壤质量含水量大约在 $161 \sim 169 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤相对含水量在 75.0% ~ 79.0%) 时,净光合速率较高,达到其最高水平的 70% 以上,能获得中度以上的光合生产力水平,而水分利用效率较低,小于其最高水平的 75% 并随土壤相对含水量增加而明显下降,故称其为“中产低效水”。土壤质量

含水量在 $140 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤相对含水量在 65%) 左右时,净光合速率和水分利用效率均能达到最高水平,将其称之为“高产高效水”。

半干旱黄土丘陵区最突出的问题是干旱和缺水,农林业建设以有效提高土壤水分利用效率为核心,并非以充分供水以达到最高产量为目标^[26,27]。所以,维持最高蒸腾作用和光合作用的土壤含水量不应作为本地区的土壤水分管理标准,而维持较高水分利用效率的“中产高效水”(土壤相对含水量为 46.5% ~ 65%) 是比较适宜的苹果园土壤水分阈值。在此阈值内,土壤含水量越高,苹果树的生产力和水分利用效率越高,其中最佳的土壤相对含水量为 65.0% 左右,能使苹果树达到高产高效的生产力水平。

4 结论

(1) 金矮生苹果叶片光合作用的土壤水分补偿点(净光合速率为零时的土壤湿度)在土壤质量含水量为 $46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,对应的土壤相对含水量为 21.5% 左右,小于此值时土壤水分对光合作用无效。对净光合速率有效性最高的土壤质量含水量为 $160 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤相对含水量为 75%) 左右;对叶片水分利用效率有效性最高的土壤质量含水量为 $140 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤相对含水量为 65%) 左右;对叶片蒸腾作用有效性最高的土壤质量含水量大约为 $170 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤相对含水量为 78%) 左右。

(2) 随着土壤湿度的减小,苹果叶片净光合速率降低的原因是气孔因素向非气孔因素转变,发生转变的土壤水分临界值在土壤质量含水量为 $100 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (土壤相对含水量为 46.5%) 左右。这也是对叶片水分利用效率保持较高有效性的土壤水分下限,也是半干旱黄土丘陵区苹果生长所允许的土壤水分最大亏缺程度。

(3) 金矮生苹果园的土壤相对含水量在 21.5% 以下为“无产无效水”;在 21.5% ~ 46.5% 为“低产低效水”;在 46.5% ~ 65% 为“中产高效水”;在 65% ~ 75% 阈值内为“高产中效水”;在 76% ~ 79.0% 阈值内为“中产低效水”;土壤相对含水量大于 79% 属于“低产低效水”。

(4) 在半干旱黄土丘陵沟壑区,金矮生苹果园适宜的土壤相对含水量为 46.5% ~ 65.0% (“中产高效水”的范围),最佳的土壤相对含水量阈值为 65.0% 左右,此含水量能使苹果树达到高产高效生产力水平,称之为“高产高效水”阈值。

参考文献:

- [1] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99~ 104
- [2] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 85~ 183
- [3] 杜尧东, 宋丽莉, 刘作新. 农业高效用水理论研究综述[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 808~ 812
- [4] 山仓, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础[J]. 应用生态学报, 1991, 2(1): 70~ 76
- [5] 刘文兆. 作物生产、水分消耗与水分利用效率间的动态联系[J]. 自然资源学报, 1998, 13(1): 23~ 27
- [6] 徐呈祥, 马艳萍. 苹果对水分胁迫的反应特点及节水灌溉研究综述[J]. 南京农专学报, 2000, 16(2): 15~ 22
- [7] 张立新, 赵志勖. 渭北旱原红富士苹果园不同降水年型水分管理模式研究[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(1): 26~ 32
- [8] 李岩, 李德全, 潘海春. 土壤干旱胁迫下苹果叶片膨压维持对光和速率及生长的影响[J]. 果树科学, 1998, 15(4): 289~ 292
- [9] 曹慧, 兰彦平, 高峰. 土壤水分胁迫对短枝型苹果树光合速率的影响[J]. 山西农业大学学报, 2000, 20(4): 356~ 359
- [10] 曲桂敏, 沈向, 王鸿霞. 土壤干旱时苹果果实对叶片水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 86~ 90
- [11] 接玉玲, 杨洪强, 崔明刚. 苹果叶片水分利用效率与土壤含水量的关系[J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 387~ 390
- [12] 郭庆荣, 张秉刚. 土壤水分有效性研究综述[J]. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4(2): 119~ 124
- [13] 上官周平. 冬小麦对有限水分高效利用的生理机制[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 567~ 569
- [14] Vehmeyer F J. The availability of soil moisture to plants: Results of empirical experiments with fruit trees[J]. Soil Sci, 1972, 111: 268~ 294
- [15] Richards L A. Soil water and plant growth[A]. In: Shaw B T. Soil physical conditions and plant growth[M]. New York: Academic Press, 1952: 73~ 251
- [16] Philip J R. Plant water relations: some physical aspect[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1966, 17: 245~ 268
- [17] 刘昌明, 王会肖. 土壤 作物 大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 160~ 152
- [18] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 214~ 249
- [19] 周择福, 李昌哲. 北京九龙山不同植被土壤水分特征的研究[J]. 林业科学研究, 1994, 7(1): 48~ 53
- [20] 郭庆荣, 李玉山. 黄土高原南部土壤水分有效性研究[J]. 土壤学报, 1994, 1(3): 236~ 243
- [21] 周择福, 李昌哲. 北京九龙山不同立地土壤蓄水量及水分有效性的研究[J]. 林业科学研究, 1995, 8(2): 182~ 187
- [22] 邵明安. 黄土区土壤水分有效性研究[J]. 水利学报, 1987(8): 38~ 44
- [23] 王孟本, 李洪建. 黄土高原人工林水分生态研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 58~ 64
- [24] Bery J A, downton W J S. Environment regulation of photosynthesis [A]. In: Govind J. Photosynthesis vol. II [C]. New York: Academic Press, 1982: 263~ 342
- [25] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Ann Rev Plant Physiol, 1982, 33: 317~ 345
- [26] 王斌瑞, 王百田. 黄土高原径流林业[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 10~ 20
- [27] 王克勤, 王斌瑞. 集水造林林分水分生产力研究[J]. 林业科学, 2000, 36(增刊 1): 1~ 9