

晋西地区不同树龄富士苹果树群体冠层 结构特征研究

王 亮, 郭小平, 毕华兴, 代 巍, 史小丽

(北京林业大学 水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

【摘 要】 【目的】探讨苹果树群体在生长过程中冠层结构的变化特征及其影响。【方法】以山西省吉县东城乡 3~20 年生富士苹果树为试材, 每种树龄群体选择 12 株样树, 使用 LAI-2000 冠层分析仪, 对其叶面积指数(LAI)、冠层开度(DIFN)、平均叶倾角(MTA)、消光系数(K)等冠层参数进行测算, 同时测定干周粗、树高、冠幅、枝下高、冠高和郁闭度等果树形态指标, 然后对不同树龄富士苹果树群体的冠层参数及其形态指标进行对比分析。【结果】随着树龄的增加, 苹果树群体的 DIFN 不断减小, 从 0.89 下降到 0.09; LAI 逐渐增加, 从 0.29 增加到 3.54; MTA 的变化总体呈下降趋势, 但是 8 和 12 年生的苹果树群体 MTA 又呈上升趋势, MTA 与树冠的 5 个天顶角关系密切, 当两者角度接近时, 该天顶角方向上的太阳光线入射较多; K 逐渐增加, 从 0.38 增加到 0.68。【结论】综合冠层结构参数来看, 3~10 年生苹果树群体内透光、通风状况良好, 其中 3~8 年生苹果树群体 DIFN 在 0.4 以上, LAI 小于 1.5, MTA 在 30°以上, K 小于 0.4; 10 年生苹果树群体整体长势好, DIFN 为 0.28, LAI 为 2.17, MTA 为 26°, K 为 0.59, 这种冠层结构有利于群体发展; 12 年以上苹果树群体 DIFN 在 0.2 以下, K 增加到 0.6 以上, 群体内部光照少, 通风差; 而 20 年生苹果树群体 DIFN 不足 0.1, LAI 高于 3.5, MTA 为 8°, K 接近 0.7, 此时群体长势差, 果树群体外围郁闭, 内部光秃。同时, 当冠层天顶角与 MTA 角度相近时, 该天顶角方向的冠层开度较大, 可根据不同树龄 MTA 的特征, 并结合当地太阳高度角的变化特征, 来进行果树修剪, 控制树冠张开的角度。

【关键词】 苹果树树龄; LAI-2000 冠层分析仪; 冠层结构; 叶面积指数

【中图分类号】 S661.105⁺.1

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)11-0115-06

Study on the canopy characteristics of different ages Fuji apples trees in Jinxi Loess Plateau area

WANG Liang, GUO Xiao-ping, BI Hua-xing, DAI Wei, SHI Xiao-li

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory for Soil and Water
Conservation Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】 The study was to explore the canopy changing characteristics of the Fuji apples in its life activity and its impact. 【Method】 At Dongcheng township of Jixian county in Shanxi province, 3 to 20 years old Fuji apple trees were used as experimental material, 12 trees from the different age communities, were chosen to determine the canopy structure parameters of different age apple trees, such as LAI, DIFN, MTA and extinction coefficient (K) using the LAI-2000 canopy analysis instrument. At the same time, the shape index of different age apple trees, such as the trunk girth, height, crown, height below canopy, and so on was obtained, then the anopy structure parameters and the the shape index of different age Fuji apple trees were compared and analyzed. 【Result】 With the increases of age, the DIFN is reduced from 0.89 to 0.09. The LAI is gradually increased from 0.29 to 3.54. The change of MTA is not very clear with

* [收稿日期] 2010-04-07

[基金项目] 国家“十一五”科技攻关项目(2006BAD03A05)

[作者简介] 王 亮(1985—), 男, 辽宁阜新新人, 硕士, 主要从事水土保持和工程绿化研究。E-mail: wangliang850508@126.com

[通信作者] 郭小平(1962—), 男, 甘肃天水人, 副教授, 博士, 主要从事水土保持和工程绿化研究。

a downward trend in the overall phase, but with a rise in the 8 and 12, close to five zenith angle. When they are similar in the angle, the direction of the zenith has more sunlight injection. 【Conclusion】 Looking at the overall canopy structure parameters, the canopy structures of 3 to 10 years old apple trees are better than others. DIFN of 3 to 8 years old apple trees is above 0.4, LAI less than 1.5, MTA above 30 degree, and the extinction coefficient less than 0.4. These communities have better translucent and ventilation; the 10-year-old apple community grow well as a whole. DIFN is 0.28, LAI 2.17, MTA 26 degree, and the extinction coefficient 0.59. This canopy structure is conducive to group development; DIFN of apple community over than 12 years old is lower than 0.2, the extinction coefficient is increased over 0.6. The communities are few with light and wind; DIFN of 20-year-old community is less than 0.1, LAI higher than 3.5, MTA 8 degree, and the extinction coefficient up to 0.7. In this moment, the community light environment is the worst. The community appears external canopy, internal bare. When the zenith angle is close to the MTA, the zenith angle direction has large DIFN, so it can provide scientific basis to the fruit tree pruning, and promote the photosynthetic productivity of the apple trees community.

Key words: age of apple tree; LAI-2000 canopy analyzer; canopy characteristic; leaf area index

植物的冠层结构是指地上部分物质的总数和组织结构,其深刻影响植物与环境的相互作用,直接决定了植物和周围环境的物质与能量交流^[1]。在苹果树的生长过程中,由于其冠层结构的不断变化,形成了一些特定的冠层结构特征,根据这些特征进行相应的果园管理工作,使树体的动态生长与果园的静态群体结构、枝叶空间分布等保持一个协调的关系,是优质生产的关键。因此,确定适宜的树冠大小和合理的冠层结构空间分布,使果园保持优质丰产的群体结构,已经成为当前研究的热点。目前,大多数学者多侧重于研究光照对不同品种、不同树形苹果树产量的影响^[2],以及苹果树的不同冠层结构对光合能力的影响^[3-4],而针对不同树龄苹果树群体冠层结构特征的研究鲜见报道。

本研究以山西省吉县东城乡宽梁顶 3~20 年生富士苹果树为试材,使用 LAI-2000 冠层分析仪,测定不同树龄苹果树群体的叶面积指数(LAI)、冠层开度(DIFN)、平均叶倾角(MTA)和消光系数(K)等冠层结构参数,分析不同树龄幼龄果园和成龄果园群体的冠层结构变化规律,以期为当地果树修剪以及果农复合经营模式的选择提供科学依据。

1 试验区概况

试验区位于山西省吉县东城乡(E110°41', N36°06'),平均海拔 1 300 m 左右,为典型的黄土残塬沟壑区。该地区属暖温带大陆性气候,昼夜温差大,年均气温 10℃,年均日照时数 2 740 h,无霜期 175 d 左右,年均太阳总辐射量为 5 440 MJ/m²;年均降水量 580 mm 左右。受水热条件影响,土壤发育较完

全,养分含量较丰富,普遍分布的地带性土壤类型为褐土,适宜于作物和多种树木生长。该地区果树主要以苹果树为主,是我国黄土高原优质苹果的主要产区。

2 研究方法 with 数据处理

2.1 试验设计

本试验设在山西省吉县东城乡富士苹果园,选择苹果树树龄为 3~20 年的红富士果园,株行距均为 4 m×5 m,成龄果树的树冠结构为开心形,每种树龄群体选择 12 株样树,调查样地的苹果树群体立地条件相同,同龄果树的栽植条件、修剪方法一致。

试验于 2008-07—2008-09 进行,每月中旬选择无太阳直射的晴朗早晨和傍晚或多云的白天,进行 3~5 d 的测量,使用美国 Li-cor 公司生产的 LAI-2000 冠层分析仪进行 LAI、DIFN、MTA、K 等冠层结构参数的数据采集。LAI-2000 冠层分析仪的探头是一组光学镜头,其内部感应部件将镜头从中心向外分为 5 个环形,当镜头水平放置时,5 个环形张开的角度分别为 7°,23°,38°,53°和 68°,为 5 个天顶角(图 1)。测量中按照仪器测量群体冠层结构的误差(大于 10%)要求,使用 45°镜盖,对树冠进行 1 个方向的测量,测量时对果园树体进行对角线测量获取 B 组数据,在露天获取 A 组数据,通过机器内部设置的植物冠层辐射转移模型公式程序,对 2 组资料进行对比计算,得出 LAI、DIFN、MTA、K 等冠层结构参数值。测量中探头始终保持水平,高度保持在距离地面 30 cm 处,每个样地苹果树群体重复测量 3 次。在得到群体整体 DIFN 的同时,也可获得

冠层上不同角度的 DIFN。同时进行干周粗、树高、冠幅、枝下高等果树基本指标的测定,用样点法测定郁闭度。其中 3~10 年生的苹果树群体冠高、冠幅较小,株行间开阔,群体通风透光较好;12~20 年生的苹果树群体开始郁闭,冠高、冠幅较大,树体枝干开始交叉,群体通风透光情况较差。不同树龄群体基本指标见表 1。

2.2 数据处理

运用 FV2000-1.0、Excel 等软件进行数据处理,其中包括 LAI、MTA、DIFN、K 等冠层结构参数,然后对这些参数和群体结构形态指标进行分析。

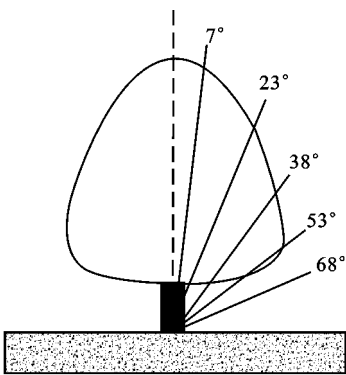


图 1 冠层不同天顶角的图像

Fig.1 Photo of canopy at different angles

表 1 不同树龄苹果树群体的基本特征

Table 1 Basic feature of apples community at different ages

树龄/年 Age	树高/m Height	干周粗/cm Trunk girth	枝下高/cm Height below canopy	冠高/m Canopy height	冠幅/m Crown	郁闭度 Canopy density
3	2.3	4	83	1.8	0.8	0.03
5	2.8	10	80	2.2	1.3	0.08
8	3.2	15	65	2.5	2.0	0.16
10	3.5	21	65	3.1	2.8	0.32
12	4.0	26	65	3.6	4.2	0.72
15	4.1	30	60	3.8	5.6	0.89
20	4.1	34	75	3.6	6.2	0.95

3 结果与分析

3.1 不同树龄苹果树群体的冠层开度

群体内太阳辐射强度的变化与其冠层结构密切相关,当太阳辐射到达树冠后,一部分被冠层吸收,一部分透过冠层,另一部分被冠层反射或散射,因此冠层的结构特征直接影响群体内的太阳辐射强度。DIFN 是能够准确表达冠层结构特征的指标。LAI-2000 冠层分析仪测得的 DIFN,与全天群体透光率关系密切,且完全可以使用 DIFN 估计透光率^[5]。

从图 2 可以看出,随着树龄的不断增长,苹果树群体的 DIFN 不断减小,从 0.89 下降到 0.09。其中树龄为 8~10 年时 DIFN 的下降幅度最大,下降了 0.28,其余树龄阶段下降幅度均低于 0.2,这可能是由于果树在此期间的生长速度较快。从图 2 还可以看出,3~10 年生的苹果树群体 DIFN 较大,均高于 0.28,林下透光多,群体长势好。其中 3~8 年生的苹果树群体 DIFN 均在 0.5 以上,因为此时的苹果树正处于幼龄阶段,苹果树群体的冠层结构单一,冠幅在 2.0 m 以内,果树群体的郁闭度较小,不足 0.2,株行间相互遮蔽少,因此苹果树群体整体透光好,此时可以进行合理间作,以起到“以园养园”的作用;10 年生苹果树群体 DIFN 为 0.28,冠幅在 3.0 m 以内,郁闭度为 0.32,群体的通风透光状况良好,果园整

体长势好,这种结构有利于群体的发展;12~20 年生的苹果树群体 DIFN 开始变小,其值均低于 0.2,冠幅均大于 4.0 m,郁闭度高于 0.7,果树的冠层结构开始分层加厚,群体密闭,其中 15 和 20 年生的苹果树群体 DIFN 均在 0.15 以下,冠幅在 5 m 以上,郁闭度高于 0.89,群体严重密闭,群体内部已出现部分无光区,而较低的光辐射量会影响果树花芽的形成^[6],造成产量下降。20 年生苹果树群体出现了结果部位外移,树冠外围郁闭,内部光秃等现象,说明其群体内部透光状况极差,需要进行适当修剪,以调整树体结构,改善群体内的通风透光条件。

3.2 不同树龄苹果树群体的叶面积指数

LAI 是指单位面积上全部叶片面积与所占单位面积之比,其既是一个重要的生物结构参数,也是在较大尺度上表征对光能吸收的一个重要的生物学指标^[7]。

由图 3 可以看出,随着苹果树树龄的不断增长,苹果树的 LAI 不断增大,从 0.29 增加到 3.54。其中 8~10 年生苹果树 LAI 增长量最大,为 0.91,这与冠层开度的下降幅度一致。随着群体叶面积的增加,果园群体的透光率下降,影响了群体的生长情况。LAI 的高低影响着苹果的产量和品质,过高或过低都会对群体产量产生不利影响。3~8 年生苹果树群体尚处于幼龄阶段,干周粗在 0.15 m 以内,

冠幅均小于 2.0 m,生物量较小,所以 LAI 较小,均低于 1.5;3~5 年生苹果树群体 LAI 的增长量为 0.40,增长较小,这可能是由于果树刚刚栽植,对自然条件尚处于适应阶段;5~8 年生苹果树群体的 LAI 增长了 0.64;8~10 年生苹果树的 LAI 增长了 0.91,此时的 LAI 增长速度较快,是由于果树群体正处于快速生长状态;10~12 年生苹果树群体的

LAI 增长了 0.35,增长幅度有所下降,但是 12~15 年生苹果树群体 LAI 增长了 0.43,15~20 年生 LAI 增长了 0.59,苹果树群体 LAI 增长幅度又在上升,这可能是由于苹果树群体在生长过程中种间相互竞争形成了优势木,从而造成了增长幅度的加大。但过高的 LAI 会影响苹果树群体的发芽和果园产量^[8],因此维持一个稳定的 LAI 是果园发展的前提。

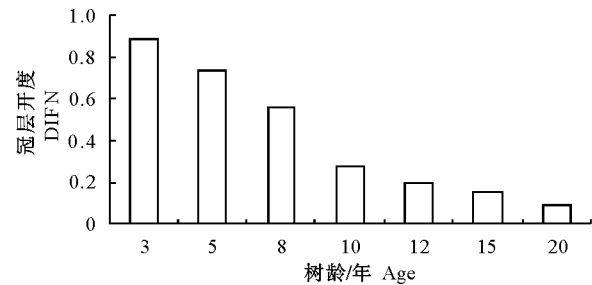


图 2 不同树龄苹果树群体冠层开度的比较
Fig. 2 Comparison of the DIFN in different ages of apple tree communities

3.3 不同树龄苹果树群体的平均叶倾角与群体内辐射的衰减情况

MTA 是指树叶表面垂线与铅垂线的夹角,介于 0°~90°^[9]。MTA 越小,表明叶子越平展,对太阳辐射的截获能力越强。

从图 4 可以看出,随着苹果树树龄的不断增长,苹果树群体的 MTA 总体呈下降趋势,从 50°下降到 8°,但在树龄为 8 和 12 年时又处于上升状态,分别为 40°和 35°。对于不同树种,MTA 随着树龄的增长在不断减小^[10],而本研究中,MTA 的变化差异可能与观测时期有关,而且 MTA 与树种等遗传因素关系较大。由图 4 可以看出,3~12 年生苹果树群体的 MTA 在 30°~50°,15、20 年生苹果树群体的 MTA 在 10°左右,叶片趋于平展且重叠,增强了苹果树冠层对光的截获,从而影响着苹果树群体内太阳辐射的衰减情况。

K 指光在冠层内部因被吸收和散射而降低的程度,主要受太阳高度角和叶倾角的影响。由 Beer-Lambert 方程^[11]求得 K 的表达式为:

$$K=-\ln(I_o/I_z)/LAI, \tag{1}$$

$$K=(1-I_o/I_z)/LAI. \tag{2}$$

式中: I_o 、 I_z 分别为到达林下的总辐射和冠层总辐射,两者的比值约等于透光率。利用(1)式时,将林分的林冠上表面看作是平的,这在果园充分郁闭时是可以的。而当果园处在幼龄阶段时,由于林冠上表面凹凸不平,需用(2)式表示,此时 K 即为该树种的平均消光系数。通过 LAI-2000 冠层分析仪测得

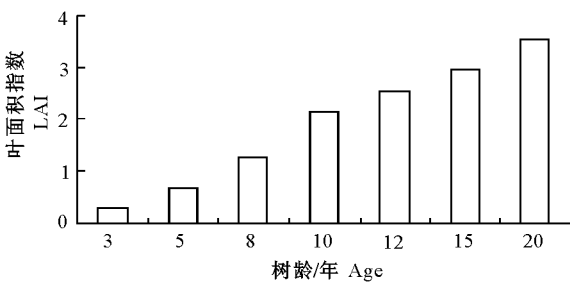


图 3 不同树龄苹果树群体叶面积指数的比较
Fig. 3 Comparison of LAI in different ages of apple tree communities

的 DIFN 可以完全估计透光率,进而可求出不同树龄苹果树群体冠层的 K 值。

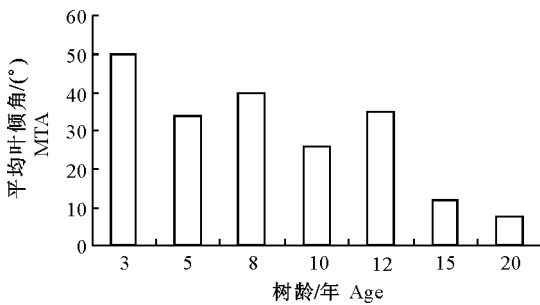


图 4 不同树龄苹果树群体平均叶倾角的比较
Fig. 4 Comparison of MTA in different ages of apple tree communities

通过计算可得出,3,5,8,10,12,15,20 年生苹果树群体的 K 值不断增大,分别为 0.38,0.39,0.40,0.59,0.64,0.64,0.68。其中 3~8 年生苹果树群体的 K 较小,在 0.4 以下,此时的 MTA 在 40°左右,叶片属半倾斜状,对太阳辐射削弱较小;10 年生以上苹果树群体的 K 开始增大,冠层的消光能力增强,20 年生苹果树群体 K 已达 0.68,此时的 MTA 为 8°,叶片几乎接近于水平状,相互重叠,层层削弱了太阳辐射,群体冠层结构较差。因此,如果通过修剪果树树体形成合理的冠层结构,使太阳辐射能够更多地进入群体,将会提高苹果树群体整体的生产力,但是目前还没有相关报道。

本研究在利用 LAI-2000 冠层分析仪测得苹果树群体冠层结构参数的同时,发现 5 个天顶角下的

DIFN 值存在显著差异,并且与 MTA 关系密切。由图 4 和图 5 可知,苹果树群体不同天顶角的 DIFN 随着树龄的增加而减小,减小的趋势有所不同,同时 5 个天顶角下出现的 DIFN 峰值存在显著差异,并且与 MTA 密切相关。3 年生苹果树群体的 DIFN 峰值出现在 53°部分,其 MTA 为 50°;5 年生苹果树群体的 DIFN 峰值出现在 38°处,MTA 为 34°;8 年

生的 DIFN 峰值出现在 38°处,MTA 为 40°;10,12,15,20 年生苹果树群体均呈现此趋势,即 DIFN 出现峰值的天顶角与 MTA 的角度相近。因此可以结合当地太阳高度角的变化特征,以及不同树龄苹果树的冠层特征,以进行果树修剪来控制树冠结构及叶片角度,使太阳辐射更多地到达苹果树群体内部,促进苹果树群体整体产量上升。

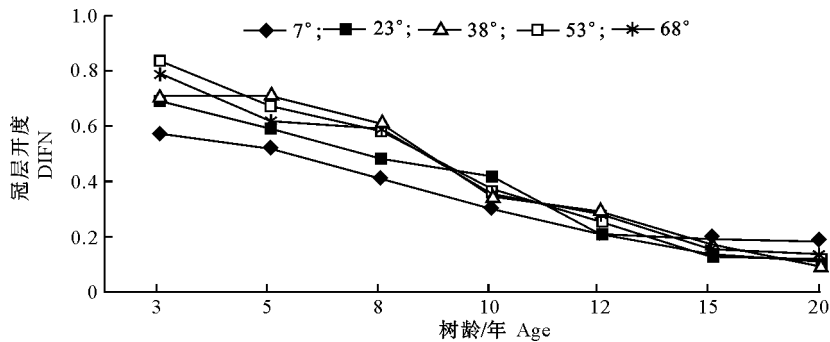


图 5 不同树龄苹果树不同天顶角冠层开度的比较

Fig. 5 Comparison of the numerical of different zenith angle DIFN of different age apple trees

4 讨 论

植株 LAI 的大小是植株生长旺盛与否的重要标志,但是在经济林上往往又存在矛盾的一面,即在单株果树 LAI 较高时,有利于其自身进行光合作用,但是由于植株间的相互遮阴,使群体整体的光能利用率降低,造成群体内部的透光较差,花芽形成少,致使果园群体生产力下降。因此,对于盛果期果园如何维持一个理想的群体叶面积和个体 LAI,是保证果树产量和健康生长的关键。研究表明,苹果园的 LAI 维持在 3~4 较为理想^[12],而本研究结果表明,LAI 维持在 2~2.5 较理想,即 10 年生苹果树群体的 LAI 有利于群体发展,LAI 为 2.17,而 12 年以上苹果树群体的 LAI 高于 2.5,明显影响了群体的通风透光和整体光合生产力。本研究的 LAI 与其他文献存在差异,这可能是因为树形和品种均会影响到 LAI,一般开心形树体的 LAI 偏低。

研究认为,成龄苹果树丰产群体结构的 LAI 应该在 3~4,DIFN 保持在 30% 以上^[12]。而本研究认为,LAI 在 2~2.5、DIFN 在 0.25 以上的苹果树群体生长较好。以 10 年生的苹果树群体为代表,LAI 为 2.17,DIFN 为 0.28,其长势最佳。群体结构会因树形、树种以及修剪方式的不同,其丰产结构参数存在较大差异,因此本研究提出的丰产群体结构对于开心形富士苹果树群体具有建设性建议。宋子炜等^[10]对杨树和柳树的研究认为,随着树木胸径的增

长,MTA 在不断减小。本研究结果表明,随着苹果树树龄的不断增大,苹果树干周粗不断增加,苹果树群体的 MTA 总体呈下降趋势,但在 8 和 12 年时又处于上升状态,这可能与观测时期有关,而且叶倾角与树种等遗传因素关系较大。在苹果树的不同树龄阶段,冠层各个角度上 DIFN 的峰值存在差异,并且与 MTA 关系密切,当冠层天顶角与 MTA 角度相近时,冠层开度较大,冠层透光率较高。根据这一规律,可以根据当地太阳高度角的变化特征进行苹果园的修剪和树体管理工作,使太阳光最大可能地射入群体内部,以提高果园群体生产力^[13-17]。本文尚属探索性研究,对苹果树冠层结构的研究较浅,尤其是机理方面,还有待于进一步研究。

5 结 论

在苹果树生长的不同阶段,由于冠层结构的不同,形成了一些特定的群体冠层结构特征,根据这些特征及果树的生长规律,可以获取一个冠层结构参数的平衡点,这个平衡点可以使苹果树群体获得最大生产力,这对于构建不同树龄合理的群体结构具有一定的现实意义。本研究通过分析山西省吉县东城乡 3~20 年生苹果树群体的 DIFN、LAI、MTA 等指标,结果表明,随着树龄的增长,苹果树群体趋于郁闭,这对果树的群体生长具有一定的抑制作用。其中 3~10 年生苹果树群体冠层结构较好,而 3~8 年生苹果树群体尚处于幼龄阶段,LAI 较小,但是群

体 DIFN 较大,均在 0.4 以上,MTA 在 30°以上, K 较小,低于 0.4,此时的群体间空隙较大,冠层结构较好,可以进行适当间作;10 年生苹果树群体冠层结构较好,DIFN 在 0.28,LAI 为 2.17,MTA 为 26°,群体长势较好,这种冠层结构有利于群体发展;12 年生以后的苹果树群体长势较差,DIFN 均低于 0.15, K 在 0.6 以上,其中以 20 年的最差,DIFN 低于 0.1,LAI 大于 3.5, K 接近 0.7,MTA 为 8°,冠层内部透光极差,出现外围郁闭、内部光秃现象。

本研究使用 LAI-2000 冠层分析仪测出不同天顶角的冠层开度,发现当天顶角与 MTA 相近时,DIFN 较大。以此可根据不同树龄 MTA 的特征,并结合当地太阳高度角的变化特征,通过施用一定的果树修剪技术措施来控制树冠张开的角度等,使太阳光辐射最大限度地到达苹果树群落内部,以提高苹果树群体的光合生产力。

[参考文献]

[1] 郭 华,王孝安.黄土高原子午岭人工油松林冠层特性研究[J].西北植物学报,2005,25(7):1335-1339.
Guo H,Wang X A. Canopy characteristics of the man-made pinus tabulaeformis forests in the Ziwuling Mountain of the Loess Plateau [J]. Acta Bot Boreal Occident Sin, 2005, 25(7): 1335-1339. (in Chinese)

[2] Asada T, Arakawa O. The analysis of light interception and leaf area index(LAI) in central leader “Fuji/M26” and “Jonagold/26” apple orchards producing high yields and quality fruit [J]. Acta Hort, 2000, 525: 421-423.

[3] Sampson D A, Albaugh T J. Monthly leaf area index estimates from point-in-time measurements and needle phenology for *Pinus taeda* [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(12): 2477-2490.

[4] Palmer J W. Light transmittance by apple leaves and canopies [J]. J Appl Ecol, 1977, 14: 505-513.

[5] 王 谦,陈景玲,孙志强. LAI-2000 冠层分析仪在不同植物群体光分布特征研究中的应用 [J]. 中国农业科学, 2006, 39(5): 922-927.
Wang Q, Chen J L, Sun Z Q. The utility of LAI-2000 canopy analyzer studying the sunlight distribution characteristics in different plant clones [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(5): 922-927. (in Chinese)

[6] Carbonneau A, Lespinasse J M. Influence of canopy management on microclimate and photosynthesis [J]. Acta Hort, 1989, 243: 185-194.

[7] 高照全,魏钦平,王小伟,等.果树光合作用数学模拟的研究进展 [J].果树科学, 2003, 20(5): 338-344.
Gao Z Q, Wei Q P, Wang X W, et al. Advances in mathematical simulation of photosynthesis in fruit tree [J]. Journal of Fruit Science, 2003, 20(5): 338-344. (in Chinese)

[8] 王希群,马履一,贾忠奎,等.叶面积指数的研究和应用进展

[J]. 生态学杂志, 2005, 24(5): 537-541.
Wang X Q, Ma L Y, Jia Z K, et al. Research and application advances in leaf area index [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(5): 537-541. (in Chinese)

[9] 丁圣彦,卢训令,李昊民.天童国家森林公园常绿阔叶林不同演替阶段群体冠层结构比较 [J].生态学报, 2005, 25(11): 2862-2867.
Ding S Y, Lu X L, Li H M. A comparison of light environmental characteristics for evergreen broad-leaved forest communities from different successional stages in Tiantong National Forest Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2862-2867. (in Chinese)

[10] 宋子炜,郭小平,赵廷宁,等.北京市顺义区公路绿化植物群体的冠层结构特性 [J].生态学报, 2008, 28(8): 3779-3788.
Song Z W, Guo X P, Zhao T N, et al. A comparison of light environmental characteristics for road greening plants communities in Beijing Shunyi District [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3779-3788. (in Chinese)

[11] Vose J M, Wayne T S. Assessing seasonal leaf area dynamics and vertical leaf distribution in eastern white pine (*Pinus strobes* L.) with a Potable Light Meter [J]. Tree Physiology, 1997(7): 125-134.

[12] 张庆山.苹果优质丰产关键技术 [M].北京:中国农业出版社, 1997: 11.
Zhang Q S. The key technologies of high yield and quality about apple [M]. Beijing: Agriculture of China Press, 1997: 11. (in Chinese)

[13] 张继祥,魏钦平,于 强,等.植物光合作用与群体蒸散模拟研究进展 [J].山东农业大学学报:自然科学版, 2003, 34(4): 613-618.
Zhang J X, Wei Q P, Yu Q, et al. Advances in simulation of plant photosynthesis and colony evapotranspiration [J]. Journal of Shangdong Agricultural University: Natural Science, 2003, 34(4): 613-618. (in Chinese)

[14] Jackson J E. Light interception and utilization by orchard system [J]. Horticultural Review, 1980(2): 208-267.

[15] 周宇宇,唐世浩,朱启疆,等.长白山自然保护区叶面积指数测量及结果 [J].资源科学, 2003, 25(6): 38-42.
Zhou Y Y, Tang S H, Zhu Q J, et al. Measurement of LAI in Changbai Moutains nature research and result [J]. Resources Science, 2003, 25(6): 38-42. (in Chinese)

[16] 高登涛,韩明玉,李丙智,等.冠层分析仪在苹果树冠结构光学特性方面的研究 [J].西北农业学报, 2006, 15(3): 166-170.
Gao D T, Han M Y, Li B Z, et al. The characteristic of light distribution in apple tree canopy using WinsCanopy2004 [J]. Acta Agriculture Boreali-Occidentalis Sinica, 2006, 15(3): 166-170. (in Chinese)

[17] 李伏生,Shabtai C.利用林窗部分转换技术测定苹果树冠层结构 [J].果树科学, 2000, 17(2): 101-104.
Li F S, Shabtai C. Studies on the canopy structure of apple trees using gap fraction inversion technique (GFIT) [J]. Journal of Fruit Science, 2000, 17(2): 101-104. (in Chinese)