

火地塘油松群落中9种植物光合特性研究

张红星, 张硕新*, 雷瑞德

(西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100)

摘要:测定了秦岭火地塘林区人工油松林下9种植物(漆树、木姜子、鹅耳枥、三桠乌药、锐齿栎、水榆花楸、尖叶四照花、白檀、披针叶苔草)的光合速率、叶绿素含量以及环境因子、光合速率的日变化和季节变化,并对9种植物的光响应曲线进行了拟合。结果表明:(1)林下9种植物光合速率的日变化整体上呈“单峰”曲线。(2)年平均光合速率从大到小的顺序是:漆树、木姜子、鹅耳枥、三桠乌药、锐齿栎、白檀、水榆花楸、尖叶四照花、披针叶苔草。(3)叶绿素a、叶绿素b及叶绿素总含量鹅耳枥均最大,三桠乌药其次,披针叶苔草最小,其他植物差异不显著。本研究支持植物叶绿素含量及成分特点是对不同光照强度的生理适应这一观点。(4)按照光响应曲线拟合参数将9种植物分为4类:①耐阴喜光型:漆树、木姜子、鹅耳枥。②中性:三桠乌药、锐齿栎。③阴性:水榆花楸、尖叶四照花、白檀。其中,尖叶四照花最耐阴。④阳性:披针叶苔草。

关键词:火地塘;群落;光合特性;叶绿素

中图分类号:S718.43 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-7461(2005)01-0020-05

The Photosynthetic Characteristics of Nine Plants in Community of
Pinus tabulaeformis at Huoditang Forest Region

ZHANG Hong-xing, ZHANG Shuo-xin, LEI Rui-de

(College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The photosynthetic rate, chlorophyll content of nine plants, namely *Toxicodendron verniciflunum*, *Carpinus turczaninowii*, *Quercus aliena* var. *acuteserrata*, *Lindera obtusiloba*, *Litsea pungens*, *Sorbus alnifolia*, *Dendron-benthamia angustata*, *Symplocos paniculata*, *Carex lanceolata*, were measured in the community of *Pinus tabulaeformis* at Huoditang forest region. The modeled parameters of light curve were given. The results are as follows: (1) The diurnal courses of photosynthetic rate were single peaked. (2) The annual average net photosynthetic rate was: *T. verniciflunum* > *L. pungens* > *C. turczaninowii* > *L. obtusiloka* > *Q. aliena* var. *acuteserrata* > *S. paniculata* > *S. alnifolia* > *D. angustata* > *C. lanceolata*. (3) The contents of chlorophyll a, chlorophyll b and the total contents of chlorophyll were the highest in *C. turczaninowii*, and the lowest in *C. lanceolata*. The differences of chlorophyll content were not distinct in others. (4) Nine plants were grouped for four classes under the modeled parameters of light curve: ①Shade-tolerant & light loving species: *T. verniciflunum*, *L. pungens*, *C. turczaninowii*. ②Neutral species: *L. obtusiloka*, *Q. aliena* var. *acuteserrata*. ③Shade species: *D. angustata*, *S. alnifolia*, *S. paniculata*. ④Light loving species: *C. lanceolata*.

Key words: Huoditang; community; photosynthetic character; chlorophyll

绿色植物光合作用是地球上唯一大规模地将无 机物转变为有机物,将光能转化为化学能的过程。

收稿日期:2003-12-31

基金项目:国家林业局“十五”重点项目“陕西秦岭火地塘森林景观特征及生态功能研究”(2001-2004)

作者简介:张红星(1977-),男,河南淇县人,硕士,研究方向为植物生理生态。

* 通讯作者:张硕新。

它对整个生物界和人类的生存发展,以及保持自然界的生态平衡都具有重要的意义。而对植物光合指标的测定,可反映植物的生理特性^[1]。

国外曾有学者通过对先锋群落到顶极群落主要植物种光合作用和呼吸作用特性变化的比较揭示植物群落演替的机理^[2,3]。在国内,林地条件下关于幼树光合作用研究的报道很多^[4-6],但有关群落不同层次主要幼树、灌木、草本的光合特性同时进行比较研究以揭示群落演替机理的报道不多见。本文旨在通过对自然条件下油松人工林主要幼树、灌木、草本光合特性的测定,为退化生态系统恢复和优化生态系统结构提供理论依据。

1 研究区概况及样地特征

研究区设在秦岭中段南坡火地塘林区松栎混交林带,北纬 33°18'~33°28',东经 108°20'~108°39'。海拔 1 420~2 470 m,地形复杂,平均坡度 30~35°。年降水量 900~1 200 mm,多集中在 6~9 月,年蒸发量 800~950 mm,湿润系数 1.022,年平均气温 8~10℃,无霜期 170 d。年日照时数 1 100~1 300 h。调查区土壤以棕色森林土为主,土层厚一般在 50 cm 以上,腐殖质厚 2~10 cm,母岩为花岗岩和片麻岩。

群落中林下植物以幼树为主,灌木很少,大体可分为 3 层:幼树层、灌木层、草本层。幼树层主要为天然更新的漆树(*Toxicodendron verniciflsum*)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)、锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、三桠乌药(*Lindera obtusiloba*)、木姜子(*Litsea pungens*)、水榆花楸(*Sorbus alnifolia*)、尖叶四照花(*Dendrobenthamia angustata*)。灌木层主要为白檀(*Symplocos paniculata*)。草本层主要为披针叶苔草(*Carex lanceolata*)^[7]。

2 材料与方法

2.1 材料

选取 7 种幼树、1 种灌木及 1 种草本为研究对象,分别为漆树、锐齿栎、鹅耳枥、三桠乌药、木姜子、尖叶四照花、水榆花楸、白檀、披针叶苔草。

2.2 方法

2.2.1 光合速率的测定 选取向阳、充分伸展、无病虫害的健康叶,采用 Li-6400 便携式光合测定系统,使用开放气路,于每月上旬每天 8:00~18:00 时,每 2 h 循环测 1 次,连续测定 3 d,取平均值。与此同时,测定了环境因子的变化情况。

2.2.2 植物光合曲线的测定 Li-6400 便携式光合测定系统采用开放气路,空气流速为 0.5 L·min⁻¹,温度 20℃,相对湿度 70%,CO₂ 浓度 360~380 μmol·mol⁻¹。用 Li-6400-02B 红蓝光源设定叶室中的有效光强为 0、25、50、100、200、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800、2 000、2 200。测定叶片在每一光强下的净光合速率。通过曲线拟合得到各树种的光合参数:最大净光合速率、表观量子效率、光饱和点、光补偿点。

2.2.3 叶绿素含量的测定 采用陈福明的混和液法提取叶绿素^[8],在 722 型分光光度计上测定提取液的光密度值,根据 Arnon 公式^[9]计算叶绿素含量。

2.3 数据处理

图表绘制及数据处理均在 Excel 软件下完成;用 SAS 软件对光响应曲线的参数进行拟合,拟合所用模型为改进的光响应曲线方程^[10]:

$$P_n = P_{\max} (1 - e^{(-\alpha I / P_{\max})}) - R_d$$

式中: P_n 为净光合速率; I 为光合有效辐射强度; α 和 P_{\max} 为需要拟合的参数,生物学意义分别为表观量子效率和最大净光合速率; R_d 为暗呼吸速率。

3 结果与分析

3.1 环境因子和光合速率的日变化

环境因子包括光强、温度、相对湿度和 CO₂ 浓度。影响林地光强的因素较多,如由于风而导致的树叶晃动,树冠以及云的影响。所以,在短时间内就单个研究对象而言,光强变化不甚规则,但就整体而言,林下光强日变化呈“单峰”曲线,最高光强出现于 12:00 时左右。温度变化缓和(图 1-a)。

研究结果表明(图 1-b),林内空气 CO₂ 浓度在一天中经历了较大的变化,8:00~10:00 时,平均 CO₂ 浓度为 425.27 μmol·mol⁻¹,然后随着各种群光合作用的增强,空气中 CO₂ 含量下降,到 12:00~14:00 时,CO₂ 浓度下降到最低(369.39 μmol·mol⁻¹),而后逐渐上升,整体趋势呈倒置的抛物线。相对湿度变化不大。光合速率的日变化总体上呈现“单峰”曲线(图 2),光合速率最大值一般出现在 12:00~14:00 时。但也因各个种所处光环境的异质性而在光合日变化曲线模式以及最大光合速率的出现时间上表现出不同。三桠乌药、白檀以及披针叶苔草光合日变化趋势呈现“波浪”型。三桠乌药的最大光合速率出现在 10:00~12:00 时。

3.2 光合作用的季节变化

由图 3 可以看出,幼树、灌木、草本的光合速率

有较为一致的季节变化趋势。从6月到7月呈上升趋势,8月份因光合有效辐射的降低(表1)而减小,此后上升。一年中最大光合速率出现在9月份,而后随着植物衰老和环境因子的变化而下降。测定结果表明,群落内部,从上到下生长季平均光合速率有递减的趋势,从大到小依次是:漆树、木姜子、鹅耳枥、三桠乌药、锐齿栎、白檀、水榆花楸、尖叶四照花、披针叶苔草(表2)。

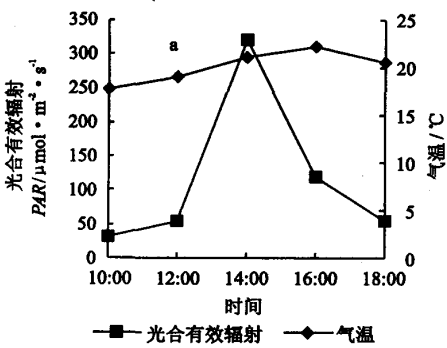


表1 环境因子的季节变化				
Table 1 The seasonal variation of environmental factors				
月份	光合有效辐射 / $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	温度 / $^{\circ}\text{C}$	相对湿度 /%	CO_2 浓度 / $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$
6	107.847 9	22.714 7	54.641 7	380.357 7
7	100.610 9	22.826 3	55.539 3	346.108 0
8	28.611 7	23.965 1	76.648 7	376.214 6
9	116.710 1	20.166 1	67.334 9	387.818 1
10	24.164 8	14.179 1	72.170 1	399.589 0

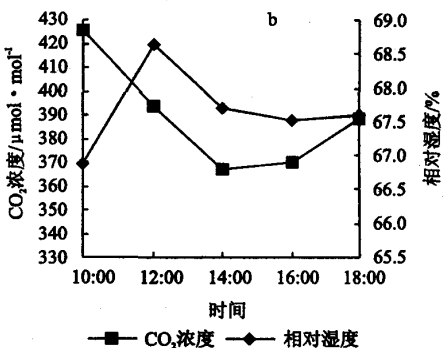


图1 环境因子的日变化
Fig. 1 The diurnal variation of environmental factors

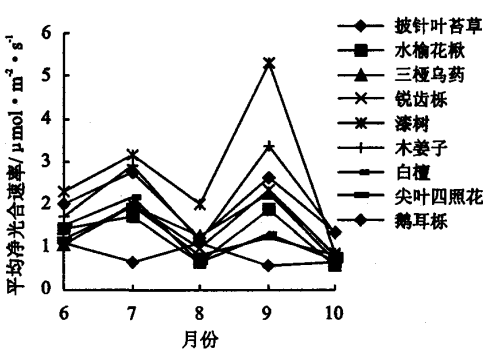
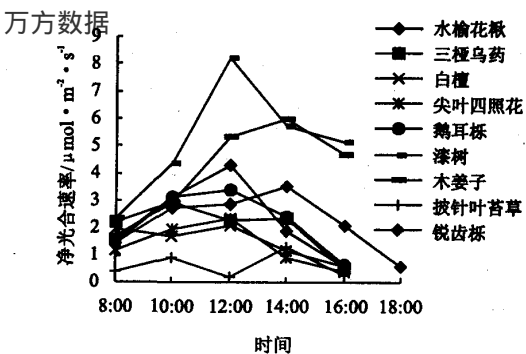


图2 光合速率的日变化
Fig. 2 The diurnal variation of photosynthetic rate

图3 光合速率的季节变化
Fig. 3 The seasonal variation of photosynthetic rate

表2 植物光合速率的季节变化						
Table 2 The seasonal variation of photosynthetic rate in the plant leaves						
种 名	6月	7月	8月	9月	10月	平均值
漆树 <i>T. veniciflora</i>	2.297 3	3.148 8	2.008 6	5.293 0	0.843 0	2.718 1
锐齿栎 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	1.049 3	2.024 6	0.984 6	2.327 8	0.830 4	1.443 3
木姜子 <i>L. pungens</i>	1.720 8	2.917 9	1.131 2	3.360 9	1.306 1	2.087 4
三桠乌药 <i>L. obtusiloba</i>	1.050 2	1.971 5	1.257 1	2.247 5	0.716 3	1.448 5
鹅耳枥 <i>C. turczaninowii</i>	1.995 7	2.734 3	1.228 3	2.620 4	1.376 0	1.990 9
水榆花楸 <i>S. alnifolia</i>	1.421 2	1.735 2	0.640 8	1.890 0	0.595 0	1.256 4
尖叶四照花 <i>D. angustata</i>	1.184 6	1.977 3	0.812 1	1.226 9	0.818 8	1.203 9
白檀 <i>S. paniculata</i>	1.524 3	2.172 7	0.642 5	1.299 1	0.691 3	1.266 0
披针叶苔草 <i>C. lanceolata</i>	1.097 8	0.656 7	1.110 0	0.594 0	0.655 1	0.822 7

3.3 植物的光响应曲线及参数拟合

由图4可以看出,在光强高于补偿点时,依光合

能力大小,可将研究对象分为3组:(1)漆树,木姜子,锐齿栎,鹅耳枥,三桠乌药;(2)白檀,尖叶四照

花,水榆花楸;(3)披针叶苔草。

通常认为耐阴植物比喜光植物的光补偿点、光饱和点低,表观量子效率高^[11]。根据表 3,把所测植物分为 4 类:(1)耐阴喜光型。这类植物的表观量子效率较大,光补偿点较低,光饱和点较高。既有较强的利用弱光的能力,可以较好适应荫蔽环境,又可以在光照充分时更好地生长。属于此类的有漆树、木姜子、鹅耳枥。(2)中性。这类植物的表观量子效率较耐阴喜光型稍低而光饱和点高,能够适应荫蔽环境,在光照充分时生长良好。属于此类植物的有三桠乌药、锐齿栎。(3)阴性。这类植物的表观量子效率大,光补偿点、光饱和点低,在弱光下比在强光下生长良好。属于此类的有水榆花楸、尖叶四照花、白檀。(4)阳性。这类植物的表观量子效率小,光补偿点、光饱和点较高,在光照较充分时生长良好。披针叶苔草可以归为阳性。披针叶苔草利用弱光力差,在光照充分时生长良好,是油松林尚未郁闭时的先锋草种,随着群落的发展及林下光环境的改变,有退出演替的趋势。

3.4 叶绿素含量

万方数据

表 3 光响应曲线拟合参数

Table 3 The model parameters for light response of net photosynthetic rate for nine species

种 名	P_{max}	α	LCP	LSP	Rd	显著性水平	样本数
漆树 <i>T. veniciflunum</i>	12.905 1	0.067 7	5.471 6	1905 ~ 1910	0.365 0	**	17
锐齿栎 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	8.085 2	0.034 0	6.258 1	2225 ~ 2230	0.210 0	**	12
木姜子 <i>L. pungens</i>	9.237 9	0.059 5	5.250 7	1625 ~ 1630	0.307 1	**	14
三桠乌药 <i>L. obtusiloba</i>	6.897 9	0.038 7	11.948 7	1760 ~ 1765	0.447 0	**	16
鹅耳枥 <i>C. turczaninowii</i>	8.197 0	0.061 7	6.958 1	1290 ~ 1295	0.418 0	**	19
水榆花楸 <i>S. alnifolia</i>	4.350 9	0.070 3	2.730 8	540 ~ 545	0.187 7	**	16
尖叶四照花 <i>D. angustata</i>	4.602 2	0.090 5	2.053 5	455 ~ 460	0.182 1	**	17
白檀 <i>S. paniculata</i>	4.994 9	0.052 4	5.560 9	900 ~ 905	0.283 0	**	21
披针叶苔草 <i>C. lanceolata</i>	2.103 1	0.013 1	19.199 8	1485 ~ 1490	0.237 4	**	15

注:表中 P_{max} 为拟合所得最大光合速率,单位为 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;LCP 为光补偿点,LSP 为光饱和点,单位为 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; α 为表观量子效率;显著水平: ** 为极显著。

于植物适应弱光环境^[6]。就叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量而言,鹅耳枥均最大,披针叶苔草均最小,分别为 1.454、0.486、1.939 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,但仍然比油松大。油松叶绿素 a 含量为 0.934 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,叶绿素 b 含量为 0.292 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,叶绿素总量为 1.286 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[13]。叶绿素 a 在红光部分吸收带较宽,所以植物能在直射光下较充分地利用红光。叶绿素 b 含量大,说明植物利用蓝紫光的能力强,能在散射光下较好地利用蓝紫光。叶绿素总含量大,植物可以吸收较多的太阳辐射,是植物对光的生态适应。

4 结论与讨论

群落内各植物光合日进程整体上表现为单峰曲

阳性植物和阴性植物能适应不同的光照强度,与叶绿素含量及成分有关^[12]。叶绿素 a/b 最小的是鹅耳枥,最大的是披针叶苔草(表 4)。叶绿素 a/b 值低,能够利于林下弱光环境中有限的红光和维持光系统 I 和光系统 II 之间的能量平衡,从而有助

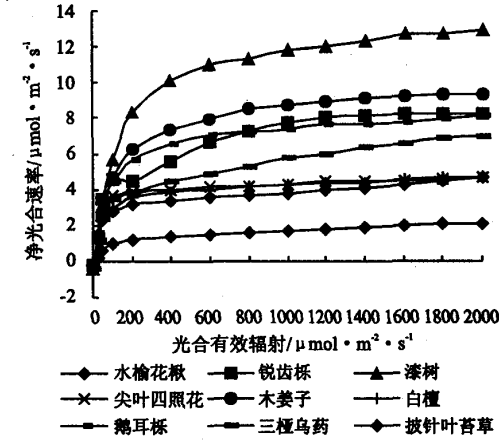


图 4 各树种光响应曲线

Fig. 4 The light response of net photosynthetic rate for different species

线,未观测到冠层常见的“午休”现象^[13-16]。这与林下光强小,在同一点上光照不连续,林内湿度大有关。峰值出现时间及日变化曲线形状因各植物所处环境不同而有差别。光合作用的日变化和季节变化的研究表明,漆树、木姜子、鹅耳枥、锐齿栎、三桠乌药均表现出较强的光合能力。

阴性和阳性植物的光饱和点差异显著,可以作为区分阴性和阳植物的一个重要指标^[17,18]。本研究根据所测得的表观量子效率、光饱和点、光补偿点将所测植物分为 4 类:(1)耐阴喜光型,包括漆树、木姜子、鹅耳枥;(2)中性,包括三桠乌药、锐齿栎;(3)阴性,包括白檀、水榆花楸、尖叶四照花;(4)阳

表 4 生长季内植物叶片的叶绿素平均含量
Table 4 The average chlorophyll content of the plant leaves during the growing season

种 名	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素总量	a/b
漆树 <i>T. veniciflnum</i>	1.783 0	0.791 7	2.574 7	2.362 2
锐齿栎 <i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	1.797 3	0.730 4	2.527 7	2.487 4
木姜子 <i>L. pungens</i>	1.943 0	0.900 3	2.843 3	2.255 0
三桠乌药 <i>L. obtusiloba</i>	2.000 5	1.035 7	3.036 2	2.020 2
鹅耳枥 <i>C. turczaninowii</i>	2.165 3	1.462 7	3.627 9	1.648 7
水榆花楸 <i>S. alnifolia</i>	1.759 8	0.715 1	2.474 9	2.566 4
尖叶四照花 <i>D. angustata</i>	1.509 5	0.596 7	2.106 2	2.537 5
白檀 <i>S. paniculata</i>	1.563 4	0.634 9	2.198 3	2.476 3
披针叶苔草 <i>C. lanceolata</i>	1.453 6	0.485 7	1.939 3	3.045 5

性,包括披针叶苔草。由各物种光响应曲线观察,依照植物到达光饱和时的净光合速率,理论上各植物光合能力由大到小可分为3组,每组内光合能力也由大到小排序为:(1)漆树>木姜子>锐齿栎>鹅耳枥>三桠乌药>(2)尖叶四照花>白檀>水榆花楸>(3)披针叶苔草。而各植物实测的季节平均光合速率由大到小也可粗略的分为3组,组内光合速率由大到小排序是:(1)漆树>木姜子>鹅耳枥>三桠乌药>锐齿栎>(2)白檀>水榆花楸>尖叶四照花>(3)披针叶苔草。对比以上研究结果可以看出,耐阴喜光树种漆树、木姜子、鹅耳枥在理论上和实际中均表现出了相对于其他种较强的光合能力,漆树最为典型。中性树种三桠乌药、锐齿栎在实际光合能力表现中,稍弱于耐阴喜光种。阴性树种光合水平整体上低于中性种和耐阴喜光种,但高于阳性草本。所以漆树、木姜子、鹅耳枥、锐齿栎、三桠乌药在构建优化生态系统以及加速退化生态系统的恢复中可以优先参考选用。曲仲湘等也认为不同植物对光的需要量(或耐阴性)是不同的,按耐阴性程度把植物划分等级,可作为造林营林时的重要参考^[12]。

测定结果表明,叶绿素含量最高的是鹅耳枥(3.627 9 mg·g⁻¹),其次是三桠乌药(3.036 2 mg·g⁻¹),草本层最小,其他幼树和灌木的叶绿素含量差异不大,皆处于2~3 mg·g⁻¹之间。草本层叶绿素含量最小,其原因是群落冠层尚未完全郁闭,而草本层的披针叶苔草多着生于不受灌木和幼树阴蔽的地方。群落中幼树和灌木的高度相差不大,所处光环境相似,这可能是它们叶绿素含量差异不大的原因。所以本研究进一步证实了叶绿素含量的变化是植物对环境条件适应性的反应这一观点^[19]。此外,研究中还发现,叶绿素总含量最高的鹅耳枥年平均光合速率并非最大,年平均光合速率最大的漆树叶

绿素总含量也不是最高。另外,相关分析结果表明,各植物成熟叶片的平均光合速率与叶绿素含量的相关系数为0.548 9,未达显著水平($P=0.125\ 9>0.05$)。所以就成熟叶片而言,叶绿素含量与光合能力的相关性并不明显。这与曾小平等对5种木本豆科植物生长季末期的研究结果一致^[5]。然而,龚垒认为处于旺盛生长期的叶子,叶绿素含量低,光合作用受到限制。随着叶片和气孔的发育成熟,叶绿素和蛋白质合成活跃,光合能力增强^[20]。笔者认为,抛开植物叶片具体生长发育阶段谈叶绿素含量与其光合能力的相关性并不科学,叶绿素含量对光合能力的影响是否也像光强和CO₂浓度一样存在一个“阈值”,有待于进一步研究。

由上述的研究结果可以预见群落动态演替的方向,即在油松林下,当前及今后竞争最为激烈的是由耐阴喜光树种以及中性树种构成的幼树层。漆树、木姜子、鹅耳枥胜出的可能性较大。竞争的结果是群落结构日趋复杂,林内光强日趋减弱。作为草本层先锋种的披针叶苔草有退出演替系列而代之以其他从形态上、生理上更为适应林下荫蔽环境的草本的趋势。

参考文献:

[1] 荆家海. 植物生理学[M]. 西安:陕西科学技术出版社. 1994.
[2] Bazzaz F A. The physiological ecology of plant succession[J]. Annu. Rev. Ecol. Syst., 1979, 10:351-371.
[3] Bazzaz F A. Physiological ecology of tropical succession: a comparative review[J]. Annu. Rev. Ecol. Syst., 1980, 11:287-130.
[4] 郑征,曹敏. 西双版纳热带季节雨林6种树种幼树在林下的光合作用[J]. 植物生态学报,1998, 22(6):499-504.
[5] 曾小平,赵平,彭少麟. 5种木本豆科植物的光合特性研究[J]. 植物生态学报,1997,21(6):539-544.

表 3 各水体水质评价指标的权重

Table 3 Index weightiness of water quality estimation in different waters

水样来源	Zn	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Cd	Pb	CODcr	BOD ₅	DO
火地沟口	0.092	0.008	0.366	0.009	0.042	0.154	0.042	0.288
板桥沟口	0.104	0.023	0.296	0.032	0.056	0.146	0.031	0.312
火地 1 支沟	0.066	0.029	0.167	0.023	0.027	0.290	0.128	0.270
火地 2 支沟	0.069	0.034	0.172	0.017	0.033	0.314	0.117	0.244

表 4 各水体水质综合评价结果

Table 4 Comprehensive estimation results of water quality in different waters

水样来源	级 别					隶属级别
	I	II	III	IV	V	
火地沟口	0.44	0.56	0	0	0	II
板桥沟口	0.56	0.44	0	0	0	I
火地 1 支沟	0.48	0.52	0	0	0	II
火地 2 支沟	0.28	0.36	0.36	0	0	II

水区径流水水质属于 II 级。

火地沟和板桥沟,火地 1 支沟和 2 支沟集水区径流水中各指标浓度分别具有相同的变化规律。

火地沟和板桥沟集水区径流水中 Mg、Ca、NH₄⁺、细菌总数、总大肠菌群数含量高于火地 1、2 支沟,而 K、CODcr、BOD₅、NO₃⁻ 含量则表现为相反的趋向。方数据

参考文献:

[1] 雷瑞德. 陕西省林业可持续发展与生态环境建设区域性特征

的思考[J]. 西北林学院学报,2003,18(1):11-14.

[2] GHZBI-1999. 地表水环境质量标准[S]. 国家环境保护总局. 1999.

[3] 雷瑞德,吕瑜良. 锐齿栎林生态系统对水质的影响及评价[J]. 西北林学院学报,2003,18(4):1-4..

[4] 张胜利,雷瑞德,吕瑜良,等. 秦岭火地塘林区森林生态系统水量平衡研究[J]. 水土保持通报,2000,20(6):18-22..

[5] 党坤良. 秦岭火地塘林区不同林分的枯枝落叶层的测定及其在水源涵养中的意义[J]. 西北林学院学报,1984,1(1):35-42.

[6] 雷瑞德. 华山松林冠对降雨动能的影响[A]. 见:林业部科技司. 中国森林生态系统定位研究[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,1994. 245-251.

[7] 袁志发. 模糊数学在农林上的应用[M]. 杨陵:天则出版社. 1990.

[8] 刘春风,翟瑞彩. 基于模糊数学的水质分析[J]. 天津大学学报,2003,36(1):87-91.

[9] GB5749-1985. 生活饮用水卫生标准[S]. 国家环境保护总局. 1985.

(上接第 24 页)

[6] 冯玉龙,曹坤芳,冯志立. 四种热带雨林树种幼苗比叶重、光合特性和暗呼吸对生长光环境的适应[J]. 生态学报,2002,22(6):901-910.

[7] 雷瑞德,彭鸿,党坤良. 火地塘林区油松林的群落类型及结构特征的研究[J]. 西北林学院学报,1996,11(增刊):65-70.

[8] 陈福明,陈顺伟. 混和液法测定叶绿素含量的研究[J]. 林业科技通讯,1984(2):4-8.

[9] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplast[J]. Plant Physiology,1949,24:1-15.

[10] 索恩利 J H M. 植物生理的数学模型——植物与植物群体生理问题的数量研究[M]. 王天铎译. 北京:科学出版社,1983.

[11] 王世绩. 木本植物耐阴性的生理学原理[M]. 北京:科学出版社,1986.

[12] 曲仲湘,吴玉树,王煥校,等. 植物生态学[M]. 北京:高等教育出版社,1983.

[13] 王翼龙. 秦岭火地塘林区三个树种光合生理生态特性研究

[D]. 杨陵:西北农林科技大学,2003.

[14] 文诗韵,杨思河,尹忠馥. 红松光合日进程测定[J]. 生态学杂志,1991,10(6):30-33.

[15] 郭连旺,沈允钢,武海,等. 杜仲光合特性的研究[J]. 植物学报,1996,38(4):283-286.

[16] 谢会成,姜志林,叶镜中. 麻栎光合作用的特性及其对 CO₂ 倍增的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2002,26(4):67-70.

[17] Boardman N K. Comparative photosynthesis of sun-and shade-plants[J]. Ann. Rev. Pl. Physiol. 1977, 28: 355-360.

[18] Hiro T. Physiological and ecological analysis of shade tolerance of plant[J]. Botl. Mag., 1964, 77: 3-9.

[19] 杨思河,姚建华. 不同林分树木叶绿素的含量及对叶绿素指标应用的想法[J]. 林业科技通讯,1984(6):7-10.

[20] 龚垒. 树木的光合作用与物质生产[M]. 北京:北京科学技术出版社,1989.