

东江中上游 4 树种水势日变化特征 及其与环境因子的关系

李召青, 张卫强, 殷祚云, 曾令海, 周平, 王明怀

(广东省林业科学研究院, 广州 510520)

摘要:在东江中上游,以 6 a 生树种木荷、红锥、火力楠和黎蒴为材料,采用 PSYPRO 露点水势仪对 4 树种在旱季与雨季的土水势、根水势、茎水势和叶水势日变化过程进行了测定,探讨了 4 树种在自然生境下的水势梯度变异及叶水势与气象因子的关系。结果表明,叶水势日变化均呈“单峰”型曲线,日均值表现为木荷>火力楠>红锥>黎蒴,旱季叶水势明显低于雨季;叶水势与大气温度(T_a)和光合有效辐射(P_{AR})呈极显著负相关($P<0.01$),而与空气相对湿度(R_H)和大气水势(Φ_a)呈极显著正相关($P<0.01$),气象因子对东江流域主要造林树种叶水势直接作用由大到小结果如下:火力楠和黎蒴($T_a>R_H>\Phi_a>P_{AR}$),红锥($R_H>\Phi_a>T_a>P_{AR}$),木荷($T_a>\Phi_a>R_H>P_{AR}$)。

关键词:水势梯度;环境因子;东江中上游

中图分类号:P715

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)01-0243-05

Diurnal Changes of Water Potential of the Four Tree Species and Its Relationships with Environmental Factors in the Upper and Middle Reaches of Dongjiang River

LI Zhao-qing, ZHANG Wei-qiang, YIN Zuo-yun, ZENG Ling-hai, ZHOU Ping, WANG Ming-huai

(Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

Abstract: By using PSYPRO water potential apparatus, six-year-old *Schima superba*, *Castanopsis hystrix*, *Michelia macclurei*, and *Castanopsis sfissa*, in the upper and middle reaches of Dongjiang River were selected as experimental materials to measure diurnal changes of soil water potential, root water potential, stem water potential, and leaf water potential of four tree species in rainy and dry season, and study on the variations of water potential gradient, and analyze the relationship between leaf water potential and meteorological factors of four tree species in natural habitats. The results showed that the daily water potentials of leaves of four tree species presented single-peak curve. The means of daily water potential of *Schima superba* was the highest, followed by *Michelia macclurei*, *Castanopsis hystrix*, and *Castanopsis sfissa* respectively. The leaf water potential of four tree species was significantly lower in dry season than that in rainy season ($P<0.05$). Leaf water potential showed significantly negative correlations with air temperature (T_a) and Photosynthetic Active Radiation (P_{AR}), and significantly positive correlations trend with relative air humidity (R_H) and air water potential (Φ_a), respectively ($P<0.01$). In addition, the meteorological factors which had a directly effect on the leaf water potential of the four species in Dongjiang watershed showing the following order: $T_a>R_H>\Phi_a>P_{AR}$ for *Michelia macclurei* and *Castanopsis sfissa*, $R_H>\Phi_a>T_a>P_{AR}$ for *Castanopsis hystrix*, and $T_a>\Phi_a>R_H>P_{AR}$ for *Schima superba*.

Key words: water potential gradient; environmental factors; the upper and middle reaches of Dongjiang river

水势是植物水分状态的基本度量单位,也是目前最常用的水分生理指标^[1],在植物水势中,叶水势是反映植物体内水分亏缺最灵敏的生理指标,并因环境

因素的变化而变化,是植物水分状况的表征,反映了植物各种生理活动受环境水分条件的制约程度^[2],尽管叶水势是水分状况的最佳度量,但是水分在植物体

内的运输取决于各组织水势的高低^[2]。目前,植物水势研究主要集中在北方干旱胁迫下植物水势特征^[1-9]和植物叶水势与环境因素^[10-16]等方面。有关南方季节性干旱的东江流域植物水势特征研究甚少,笔者依托广东东江源森林生态定位研究站,通过分析主要造林树种土水势、根水势、茎水势、叶水势及大气水势变化特征及其与环境因子的关系,为研究树种吸收水分受到土壤—植物—大气连续体系 (SPAC) 中的水势梯度的影响过程和调节机理提供科学依据,对东江中上游水源林建设具有指导意义。

1 研究区概况

研究地位于东江中上游龙川县西塘 (E115°14'11", N24°06'41"), 海拔 160 m, 属于亚热带季风气候区, 光照充足, 雨量充沛, 年均日照时数 1 704 h, 年均气温 21.0 ℃, 年均降水量 1 718.7 mm, 研究区土壤属红壤, 土壤容重为 1.20 g/cm³。试验区原为人工马尾松、杉木、尾叶桉的残林, 2003 年通过人为炼山和砍伐, 在火烧和砍伐迹地上种植阔叶树种进行人工植被恢复, 主要造林树种有: 木荷 (*Schima superba*)、阴香 (*Cinnamomum burmannii*)、火力楠 (*Michelia macclurei*)、山乌桕 (*Sapium discolor*)、黎蒴 (*Castanopsis sfissa*)、甜锥 (*castanopsis eyrei*)、枫香 (*Liquidambar formosana*)、香樟 (*Cinnamomum camphora*)、灰木莲 (*Manglietia glanca*)、麻楝 (*Chukrasia tabularia*)、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*)、红锥 (*Castanopsis hystrix*)、南酸枣 (*Choerospondias axilliaris*)、深山含笑 (*Michelia maudiae*)、印度紫檀 (*Pterocarpus indicus*)、假萍婆 (*Sterculia lanceolata*)、山杜英 (*Elaeocarpus sylvestris*)、海南蒲桃 (*Syzygium cumini*) 等。林分改造后林下植被有: 盐肤木 (*Rhus chinensis*)、桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*)、野牡丹 (*Melastoma candidum*)、拔莼 (*Smilax china*)、杨桐 (*Cycycra Japonica*)、梅叶冬青 (*Ilex asprella*)、五指毛桃 (*Ficus simplicissima*)、葫芦茶 (*Tadehagi triquetrum*)、栀子花 (*Gardenia jasminoides*)、芒萁 (*Dicranopteris Dichotoma*) 等。

2 研究方法

2.1 试验材料

在 6 年生树种红锥、火力楠、黎蒴和荷木为主的混交林内, 郁闭度为 0.65, 密度为 1 650 株/hm², 设定 20 m×20 m 样方进行调查, 每树种调查 3 个样方, 调查样方内树木株高、冠幅、胸径等基本生长状况, 见表 1。

表 1 试验树种生长状况

树种名称	树龄/a	树高/m	胸径/cm	冠幅/m×m
红锥	6	5.0	4.0	1.8×2.0
火力楠	6	6.0	4.6	2.0×2.5
黎蒴	6	4.6	6.0	4.5×4.8
荷木	6	5.4	6.0	3.0×3.5

2.2 研究方法

2.2.1 水势 在 2009 年 8 月 20 日—2009 年 8 月 28 日 (雨季) 和 2009 年 10 月 23 日—2009 年 10 月 31 日 (旱季), 典型晴朗天气, 采用美国产的 PSYPRO 露点水势仪, 从 6:00—18:00, 每隔 2 h 测定一次。叶水势测定: 选择树冠上、冠中和冠下部向阳面发育良好的枝条上部的叶片, 用打孔器取叶, 放入露点水势仪 C-52 样品室, 每 5 min 记录一次数据, 取平均值作为该时刻的叶水势; 茎水势测定: 选择树冠中部生长发育正常且太阳直射部位的小枝, 立即装入密封塑料袋中, 随后, 在枝条中部剪截长度约 3 mm 的小枝, 置于 C-52 样品室中, 每 10 min 记录一次数据, 取平均值作为该时刻的茎水势; 根水势测定: 在 20 cm 和 50 cm 浅层土壤和深层土壤处, 选择生长正常的细根, 剪截长度约 3 mm, 置于 C-52 样品室中, 每 10 min 记录一次数据, 取平均值作为该时刻的根水势; 土水势测定: 在离选择木基干 1 m 处取土, 取土深度分别为 20 cm 和 50 cm, 置于 C-52 样品室中, 每 15 min 记录一次数据, 取平均值作为该时刻的土水势。

2.2.2 大气水势 大气水势采用如下公式^[17]:

$$\varphi_a = 4.6248 \times 10^5 T \ln R_H$$

式中: φ_a ——大气水势; T ——空气绝对温度; R_H ——空气相对湿度。

2.2.3 气象因子 大气温度 (T_a)、相对湿度 (R_H) 和光合有效辐射 (P_{AR}) 等气象因子采用小气象站 (HO-BO) 进行观测。

2.2.4 土壤水分 在距离选择木基干 1 m 处取土, 取土深度为 100 cm, 每 20 cm 为一层, 采用烘干法测定。

2.3 数据处理

数据统计分析利用 Excel 2003 和 SPSS 16.0, 采用单因素方差分析, 分析同一树种不同水势差异的显著性。

3 结果与分析

3.1 气象因子分析

8 月, 雨季, T_a 的日变化呈典型的“单峰”曲线, T_a 变化范围为 33.7~40.0 ℃, 8:00 左右最低, 此后, 由于光辐射强度的迅速增加而上升较快, 到 14:00 左右达到最高温度, 之后随着光辐射强度的减弱, T_a

缓慢下降;RH 的变化趋势与 T_a 相反,在 8:00 左右 RH 最高为 90.7%,此后,随着 T_a 的升高而迅速下降,到 14:00 左右降到最低值 46.3%,之后随着 T_a 的下降又有所回升,至 18:00,RH 上升到 64.8%;PAR 在 8:00—18:00 期间的变化范围为 108.0~

1 435.9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,从早晨 8:00 开始测定时,PAR 为 536.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其后随着时间的推移,PAR 逐渐增加,至 12:00 左右达到其高峰值 1 435.9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,之后逐渐下降,至 18:00 降为最低值,为 108.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

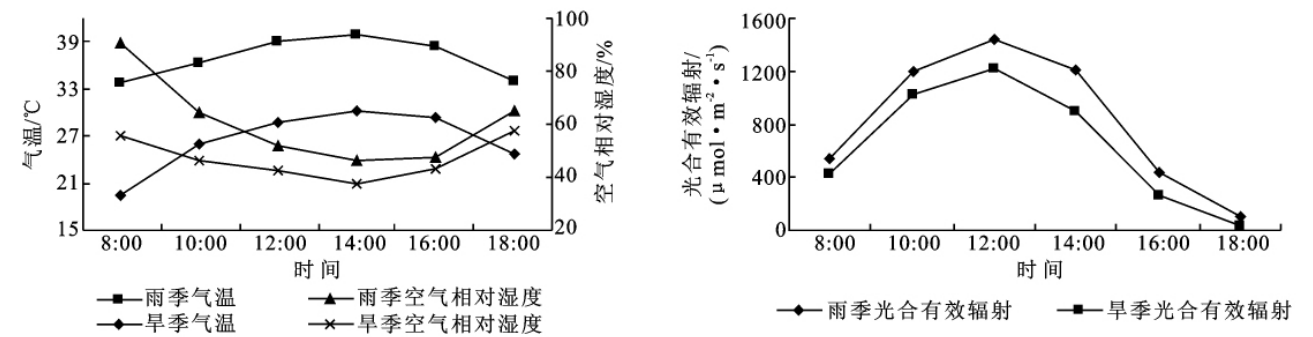


图 1 气象因子日变化

10 月,旱季,日出后 PAR 逐渐增大,在 12:00 时达到最大值,之后又逐渐减小,日变化幅度为 34.0~1 222.4 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;RH 在早晨最高,之后随着 PAR 的增强和 T_a 的升高而逐渐下降,在 14:00 时降至最低,之后由于 PAR 和 T_a 的下降,RH 又逐渐升高; T_a 变化范围为 19.4~30.1 $^{\circ}\text{C}$,8:00 左右最低,此后,由于 PAR 的迅速增加而快速上升,到 14:00 左右达到最高,之后随着 PAR 的减弱, T_a 缓慢下降。

3.2 主要造林树种叶水势日变化

在雨季,4 种树种土壤重量含水量为 27.03%~29.85%,基本保持同一水平。从图 2—3 可以看出,4 种树种叶水势日变化均具有一个明显的峰值,呈单峰状分布,峰值大多数情况出现在下午 14:00 左右,自

上午 6:00 起,各树种叶水势呈现下降趋势,这主要是由于随着光照强度和温度的上升,大气湿度下降,叶片表面蒸汽压差变大,叶片蒸腾失水加剧,而所形成的根压促使根系吸收的水分来不及补充所致,在 12:00—14:00,各树种叶片蒸腾量进一步增大,植物体根系吸水能力持续增强,但叶片水分收支进一步失衡,致使叶水势在 14:00 左右达到最低值,且不同树种叶片水分收支失衡的程度不一,表明不同树种的耐旱能力及耐旱机理存在差异;叶水势日均值表现为木荷(−1.53 MPa)>火力楠(−1.55 MPa)>红锥(−1.61 MPa)>藜蒭(−1.65 MPa),方差分析的研究结果表明,在雨季,4 种树种叶水势没有显著差异($P>0.05$)。

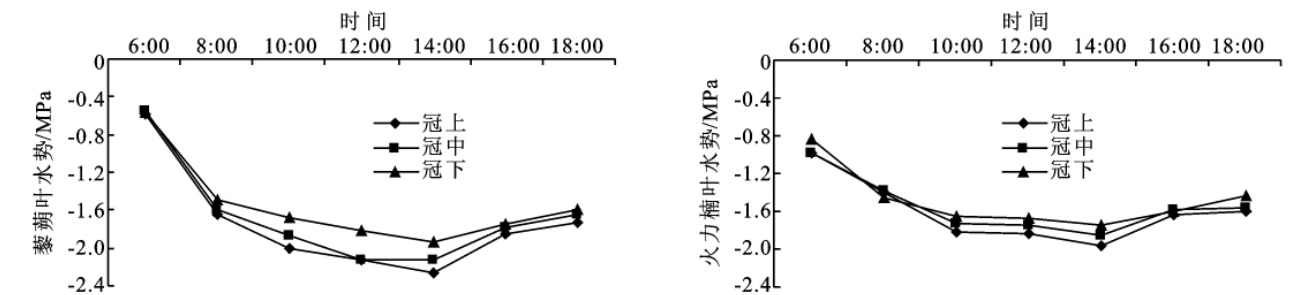


图 2 雨季藜蒭与火力楠叶水势日变化

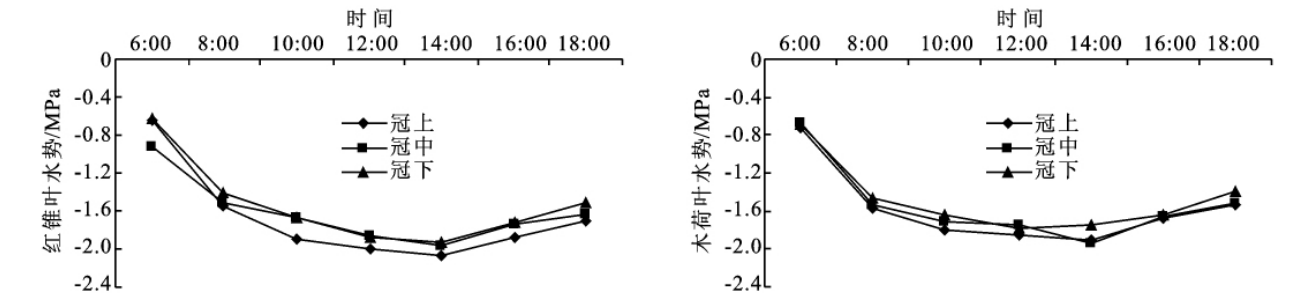


图 3 雨季红锥与木荷叶水势日变化

3.3 主要造林树种水势日变化

在旱季,4 种树种土壤重量含水量为 19.57%~22.54%,基本保持同一水平。从图 4 和图 5 可以看出,4 种树种土水势>根水势>枝水势>叶水势,主要由于水分从根输送到枝再到叶而导致植物叶片的水势均低于枝的水势,枝水势低于根水势。只有在土壤中水分含量能够满足植物需要的情况下,植物的根系才能将其从土壤中吸收来的水分源源不断地运输给枝,再由枝将水分输送到叶片以弥补叶片的蒸腾耗水,在这样的水势梯度下,植物各器官的水势大小应该表现为根水势>枝水势>叶水势^[1],说明在旱季土壤水分含量能够满足林木生长需求。

从图 4—5 可以看出,土水势日变化表现为自早晨 6:00 开始逐渐降低,下午 16:00 达到最小值,在傍晚 18:00 略有升高,日变化不明显。根水势、枝水势

和叶水势一般表现出早、晚高,中午低的日变化趋势。其中,根水势自早晨 6:00 开始降低,下降幅度大于土水势,下午 16:00 时,藜蒴、火力楠和木荷达到最小值,而红锥在下午 14:00 时达到最小值,傍晚 18:00 略有升高;6:00 左右枝水势和叶水势是白天的最高值,随着光照强度和气温的增加,枝水势急剧下降,在 14:00 左右达到最低点,之后一致保持低值,在 16:00 之后开始逐步回升,这主要是由于从早晨开始,随着光照强度的增加,气温升高,树种生理活动力如叶片蒸腾作用和光合能力逐渐加强,在土壤水分并不充足的情况下,一方面生理耗水增加造成植物体含水量的下降,另一方面植株生理需水量却在上升,导致枝水势和叶水势的降低^[18]。与雨季相比,旱季主要造林树种叶水势有明显降低,叶水势表现为火力楠>木荷>红锥>藜蒴。

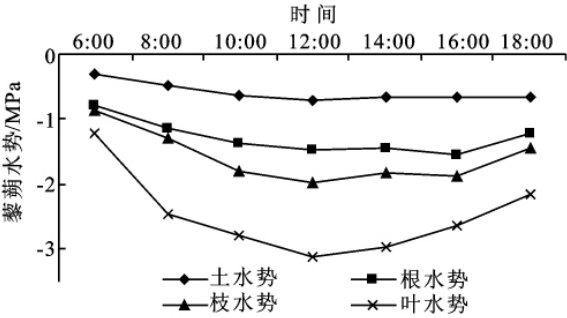


图 4 旱季藜蒴与火力楠水势日变化

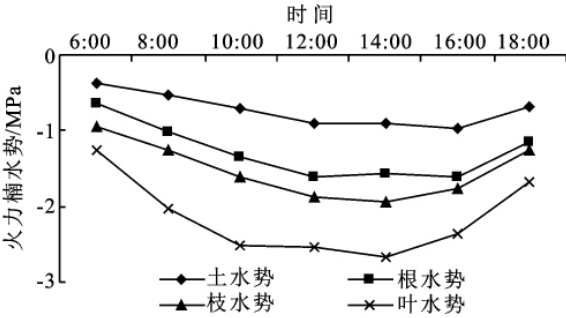


图 5 旱季红锥与木荷水势日变化

通过方差分析可知(表 2),藜蒴和木荷叶水势与枝水势、根水势、土水势差异显著($P<0.05$),枝水势与根水势差异不显著($P>0.05$),而根水势、枝水势与土水势差异显著($P<0.05$);火力楠和红锥土水势、根水势、枝水势和叶水势之间差异显著($P<0.05$)。

表 2 主要造林树种水势日均值

观测指标	藜蒴	火力楠	红锥	木荷
土壤水势	$-0.56\pm0.14d$	$-0.76\pm0.07d$	$-0.78\pm0.03d$	$-0.58\pm0.04d$
根系水势	$-1.29\pm0.05bc$	$-1.27\pm0.08c$	$-1.40\pm0.04c$	$-1.21\pm0.04bc$
枝条水势	$-1.59\pm0.11bc$	$-1.53\pm0.02b$	$-1.95\pm0.07b$	$-1.33\pm0.02bc$
叶片水势	$-2.49\pm0.05a$	$-2.16\pm0.08a$	$-2.45\pm0.13a$	$-2.07\pm0.13a$

注:同列数据间标有不同字母者在 0.05 水平上差异显著。

3.4 主要造林树种叶水势与气象因子关系

在植物各部位的水势中,叶水势代表植物水分运

动的能量水平,是组织水分状况的直接表现,反映植物在生长季节各种生理活动受环境水分条件的制约

程度^[13]。气象因子是影响植物叶水势日变化规律的重要因素。植物叶水势在一天的变化中呈先减小后增大的总体趋势,这种变化规律与大气的温度、湿度、光照强度及大气水势的节律性日变化密切相关。在雨季,以叶水势为因变量,大气温度、太阳辐射、大气相对湿度和大气水势为自变量,进行回归分析,见表 3。

表 3 主要造林树种叶水势与气象因子回归关系

树种名称	回归方程	相关系数	自由度	F	显著水平
火力楠	$\Phi_l = -5.621 - 0.057T_a + 0.070R_H - 0.00013P_{AR} - 0.027\Phi_a$	0.882	56	45.313	0.000
黎蒴	$\Phi_l = -7.152 - 0.081T_a + 0.104R_H - 0.00015P_{AR} - 0.032\Phi_a$	0.855	56	35.337	0.000
红锥	$\Phi_l = -8.040 - 0.057T_a + 0.104R_H - 0.0002P_{AR} - 0.033\Phi_a$	0.821	56	26.946	0.000
木荷	$\Phi_l = -1.018 - 0.057T_a - 0.004R_H + 0.0002P_{AR} + 0.001\Phi_a$	0.893	56	51.079	0.000

表 4 主要造林树种叶水势与气象因子之间相关系数

树种名称	气温 T_a	相对湿度 RH	光合有效辐射 PAR	大气水势 Φ_a
火力楠	-0.822**	0.719**	-0.608**	0.706**
黎蒴	-0.806**	0.769**	-0.618**	0.763**
红锥	-0.699**	0.737**	-0.619**	0.722**
木荷	-0.857**	0.807**	-0.628**	0.810**

** 在 0.01 水平上差异显著。

从表 3—4 可以看出,大气温度、空气相对湿度、光合有效辐射和大气水势是影响该地区主要造林树种叶水势的气象因子,且具有高度相关性,可用气象因子对主要造林树种的叶水势日变化进行预估^[1]。叶水势与大气温度和光合有效辐射呈极显著负相关($P<0.01$),而与空气相对湿度和大气水势呈极显著正相关($P<0.01$),气象因子对东江流域主要造林树种叶水势直接作用由大到小结果如下:火力楠和黎蒴($T_a>R_H>\Phi_a>P_{AR}$)、红锥($R_H>\Phi_a>T_a>P_{AR}$)和木荷($T_a>\Phi_a>R_H>P_{AR}$),说明火力楠、黎蒴和木荷叶水势最易受大气温度的影响,而红锥叶水势最易受空气相对湿度的影响。

4 结 论

- (1) 在雨季,4 种树种叶水势日变化均具有一个明显的峰值,呈单峰状分布;叶水势日均值表现为木荷(-1.53 MPa)>火力楠(-1.55 MPa)>红锥(-1.61 MPa)>黎蒴(-1.65 MPa);4 种树种叶水势日均值无显著差异($P>0.05$)。
- (2) 在旱季,4 种树种土水势、根水势、枝水势和叶水势表现出早、晚高,中午低的日变化趋势,水势日均值表现为土水势>根水势>枝水势>叶水势。方差分析表明,黎蒴和木荷叶水势与枝水势、根水势、土水势差异显著($P<0.05$),枝水势与根水势差异不显著($P>0.05$),而根水势、枝水势与土水势差异显著($P<0.05$);火力楠和红锥土水势、根水势、枝水势、叶水势间差异显著($P<0.05$)。
- (3) 植物叶水势与大气温度、太阳辐射、大气相对湿度及大气水势具有显著的相关关系,叶水势与大

气温度和光合有效辐射呈极显著负相关($P<0.01$),而与空气相对湿度和大气水势呈极显著正相关($P<0.01$);气象因子对主要造林树种叶水势直接作用由大到小为:火力楠和黎蒴($T_a>R_H>\Phi_a>P_{AR}$),红锥($R_H>\Phi_a>T_a>P_{AR}$),木荷($T_a>\Phi_a>R_H>P_{AR}$)。

参考文献:

[1] 庄丽,陈亚宁,李卫红,等. 渗透胁迫条件下植物茎叶水势的变化:以塔里木河下游胡杨为例[J]. 中国沙漠, 2006,26(6):1003-1008.

[2] 付爱红,陈亚宁,李卫红,等. 干旱、盐胁迫下的植物水势研究与进展[J]. 中国沙漠,2005,25(5):744-749.

[3] 曾凡江,张希明,李向义,等. 塔克拉玛干沙漠南缘柽柳和胡杨水势季节变化研究[J]. 应用生态学报,2005,16(8):1389-1392.

[4] 付爱红,陈亚宁,李卫红. 新疆塔里木河下游怪柳茎水势变化与影响因子研究[J]. 干旱区地理,2007,30(1):108-114.

[5] 付爱红,陈亚宁,陈亚鹏. 塔里木河下游干旱胁迫下多枝柽柳茎水势的变化[J]. 生态学杂志,2008,27(4):532-538.

[6] 段爱国,张建国,张俊佩,等. 金沙江干热河谷主要植被恢复树种叶水势的时空变化规律[J]. 林业科学研究, 2007,20(2):151-159.

[7] 王海珍,韩路,李志军,等. 塔里木河上游胡杨与灰杨光合水分生理特性[J]. 生态学报,2009,29(11):5843-5850.

[8] 徐炳成,山仑,李凤民. 半干旱黄土丘陵区五种植物的生理生态特征比较[J]. 应用生态学报,2007,18(5):991-996.

[9] 彭羽,薛达元,刘美珍,等. 浑善达克沙地不同光合途径植物叶片气体交换和水势特征[J]. 西北植物学报, 2009,29(10):2000-2006.

[10] 张鸣,张仁陟,蔡立群. 不同耕作措施下春小麦和豌豆叶水势变化及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报,2008,19(7):1467-1474.

[11] 姚素梅,康跃虎,刘海军. 喷灌条件下冬小麦灌浆期叶水势日变化及其影响因子研究[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(4):1-6.

式中: μ_i ——有机质含量传统方法测量值; $\hat{\mu}$ ——模型估测值; n ——建模样本数。

从表 3 可以看出,模型的校正 R^2 都在 0.5 以上,最高达到 0.85;模型的总均方根误差 RMSE 较低,小于 0.38,最低为 0.22。另外,土壤有机质含量的实测值和估测值之间线性关系(图 2), $\ln\text{SOM}$ 实测值 = $0.985\ln\text{SOM}$ 估测值, $R^2 = 0.91$ 。从图中可以看出, SOM 在 3%~5% 估测效果较好。

所以,在保证决定系数 R^2 足够大的情况下,根据模型检验结果选择波段少的模型作为最终有机质含量估测模型。通过比较,依据精度高,稳定性好,入选波段少,选择公式:

$$\ln(\text{SOM}) = -6.997 - 1.268\ln R_3 - 9.806\ln R_9 + 7.734\ln R_8 + 0.653R_3' \quad (6)$$

式中: $\ln(\text{SOM})$ ——土壤有机质含量的对数形式; $\ln R_3$ 、 $\ln R_8$ 、 $\ln R_9$ ——分别为光谱值 R_3 、 R_8 、 R_9 的对数形式; R_3' ——光谱值的 R_3 一阶导数。公式(6)用于土壤有机质含量估测。

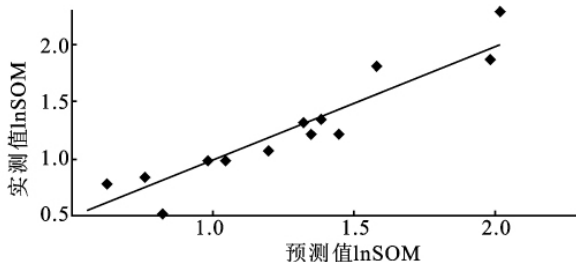


图 2 估测值和实测值散点图

2.3 表土有机质含量分类

将这个关系式应用于遥感影像中进行土壤有机质含量分类。其它研究者在分类前一般先将影像中存在的城镇等先掩膜掉,这样有助于提高土壤分类精度。在本研究区中,村庄和小城镇的分布连成片,不便于将所有村庄掩膜掉,所以先将非土地的地物类型分出来,再进行土壤有机质含量的分类(附图 12)。从

(上接第 247 页)

- [12] 韩磊,贺康宁,芦新建,等. 青海高寒半干旱区蒙古莠叶水势变化及其与环境因素的关系[J]. 水土保持通报, 2008,28(6):1-5.
- [13] 王华田,马履一,徐军亮. 油松人工林 SPAC 水势梯度时空变化规律及其对边材液流传输的影响[J]. 植物生态学报,2004,28(5):637-643.
- [14] 徐军亮,马履一,王华田. 油松人工林 SPAC 水势梯度的时空变异[J]. 北京林业大学学报,2003,25(5):1-5.
- [15] 刘静,贺康宁,韩磊. 黄土高原西部高寒区引进树种银

黑龙省北安市到哈尔滨市范围内,通过遥感影像将耕地土壤有机质含量空间分布趋势直观地显示出来。总体来看,研究区南部地区有机质含量明显低于北部地区。有机质含量随纬度的增加呈现出逐渐升高的趋势。

3 结论

通过分析遥感影像的光谱值及其数学变换形式与有机质含量的对数形式的关系,并且建立有机质含量估测模型,将研究区土壤有机质含量分为 5 个等级。利用线性回归比较估测值和测试值, $R^2 = 0.91$,模型精度较高,稳定性好。表明通过遥感影像将耕地土壤有机质含量空间分布趋势直观地显示出来。

参考文献:

- [1] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京:农业出版社,1983.
- [2] Wolf S A, Buttel F H. The political economy of precision farming[J]. Am. J. Agr. Econ., 1996,78:1269-1274.
- [3] Stone E R, Baungardner M F. Characteristic variations in reflectance of surface soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1981,45:1161-1165.
- [4] 戴昌达. 中国主要土壤光谱反射特性分类与数据处理的初步研究遥感文集[C]. 北京:科学出版社,1981:315-323.
- [5] 徐彬彬. 土壤剖面的反射光谱研究[J]. 土壤,2000(6):281-287.
- [6] Krishnan P, Alexander J D, Butler B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44:1282-1285.
- [7] 黑龙江省土壤肥料总站. 黑龙江土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1991.
- [8] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1993.
- 水牛果叶水势研究[J]. 水土保持研究,2009,16(5):194-198.
- [16] 宋耀选,周茂先,张小由,等. 肖洪浪额济纳绿洲主要植物的水势与环境因子的关系[J]. 中国沙漠,2005,25(4):496-499.
- [17] 康绍忠,刘晓明. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京:水利电力出版社,1994.
- [18] 卜崇峰,刘国彬,许明祥. 陕北黄土区狼牙刺水势研究[J]. 西北植物学报,2003,23(8):1393-1397.