

## 鼎湖山森林生态系统土壤呼吸水热效应的 数学模拟和预报\*

邓邦权 吕禄成 王德琼

(广东省土壤研究所, 广州 510650)

### 提 要

根据土壤呼吸依水热条件应变的规律, 建立起相应的模拟方程。应用土壤的水热观测数据, 预报计算了不同林地土壤呼吸强度1年的变化和呼吸量, 并对结果用于估量土壤物质能量转化的可能性作了探讨。

**关键词:** 森林土壤; 土壤呼吸; 数学模拟

鼎湖山森林土壤微生物生化强度的有关研究, 曾为检定生境下原位土壤呼吸强度设计了专用仪器方法<sup>[2]</sup>, 通过不同季节的比较检测, 从中得知不同林地土壤呼吸强度的差异和不同时期变化的总趋势。气候条件变化造成了土壤温度和水分差异, 同时对土壤呼吸强度的影响极其明显。仅凭1年内为数不多的检测结果去了解其详细变化, 计算其年呼吸量, 置信度是有限的。而这种检测, 要做到象土壤温度、水分那样, 只要临场视读, 就能以较高的观测频数去测取结果, 还存在种种实际困难。为了弥补上述的不足, 另外设计并进行了不同林地土壤呼吸水热效应的模拟试验, 找出了呼吸依水热条件应变的一般规律, 从中建立起相关方程。根据方程, 利用较详细的水热观测数据, 对不同土壤呼吸强度和呼吸量的年变化进行了计算和预报。现将有关试验结果报道如下。

### 一、设计依据

土壤呼吸作用实际上是生活在土壤中各种生命活体呼吸作用的总和, 凡是影响其中生物活性的各个因子, 如各种生命活体(包括根系、定居性低等动物、微动物、微植物以至具生物活性的酶等)生物量的大小、营养能源的丰缺、土壤质地、结构、温度、水分、pH值, 以及其他理化性状的差异等, 都会对土壤呼吸强度产生影响。但对同一土壤来说, 这些因子大多数是不变或相对稳定的, 其中只有温度和水分, 因受外界条件(如太阳辐射、大气降雨)的影响而易于变化, 故此它们成为导致土壤呼吸经常发生变化的

1989年10月6日收稿。

\* 工作是国家自然科学基金资助课题的一部分。参加课题工作的尚有李大文、葛荣盛、杜绍元、杨风等同志。张秉刚同志曾给予大力协助。

主导因子, 其中尤以温度最为明显。金沢晋二郎等人就曾根据土壤温度与土壤呼吸强度的相关回归方程, 由土壤月平均温度推算出日本长野亚高山针叶林土壤的年呼吸量<sup>[4]</sup>。

查明土壤呼吸依土壤水热条件应变的规律, 确立相应的模拟方程, 就可以根据较易于测取的详细水热数据, 预报土壤呼吸的详细变化。这种方程的建立, 以实地跟踪测定数据作基础最为理想。但在过于频繁的实测还有困难, 且又难以短期内通过跟踪取得必要数据的情况下, 利用实验室模拟, 人为地控制在各种可能的条件下进行检测, 则可以在短期内容易地取得结果。只要同时测出模拟与实测结果的比率, 作出必要的校正, 也可达到同样目的。

## 二、试验的实施

### (一) 试样采集和试验装置

在不同的林区定位观测样地中, 先多点重复测出土壤原位呼吸强度, 再选定代表性地块, 挖取直径 25cm, 深 15cm 的原状土柱, 装入底部有排水孔, 容积与土柱吻合的铁皮桶内, 以塑料膜封装, 转入实验室, 土柱表面先经除草整理, 于其旁侧插入温度计和张力(负压)计, 以分别指示土柱温度和含水量, 每种土壤张力读数与含水量的关系都须预先测知。

将桶装土柱置入温度可调的生化培养箱中, 以便控制所需的温度。水分的增减通过人工喷洒和通风蒸发来实现。每次温度或水分改变后, 其实际读数都要经过一定时间均衡稳定后才读取。

### (二) 模拟条件下土壤呼吸强度的测定

取用与野外现场测定相同的方法<sup>[1]</sup>, 以直径 12.5cm, 高 4.5cm 的呼吸罩罩在土柱表面进行集气, 经 30 min 后抽取气样, 以碱液吸收比色法测出 CO<sub>2</sub> 量, 计算其呼吸强度。

试验测定包括固定水分条件下, 随温度变化而变化的呼吸强度; 固定温度条件下随水分变化而变化的呼吸强度; 以及选定范围内温度水分错综变化条件下相应变化的呼吸强度。还专门测定与野外现场测定时完全相同的温度和水分条件下的呼吸强度, 作为模拟计算值与实测值的校正依据。

## 三、结果及讨论

### (一) 土壤温度对呼吸强度的影响

在田间持水量条件下, 土壤温度 ( $x_1$ ) 对土壤呼吸 ( $y$ ) 影响的测定结果见图 1。从图 1 可知针叶林和阔叶林的土壤呼吸强度都是随温度的升高逐步增高, 升至一定温度以后 (28—30°C) 则增速急剧加大。土壤呼吸与土壤温度之间的这种关系和 Bunt Drob-nik 等早期的研究结果<sup>[5]</sup>是一致的。也和金沢晋二郎等实地检测总结得出的呼吸强度的对数值与土壤温度成直线相关的结果<sup>[3]</sup>相似。较高土温对土壤呼吸的促进, 可能与高温下能源物质的可利用性及气体分子运动速度的提高有关。

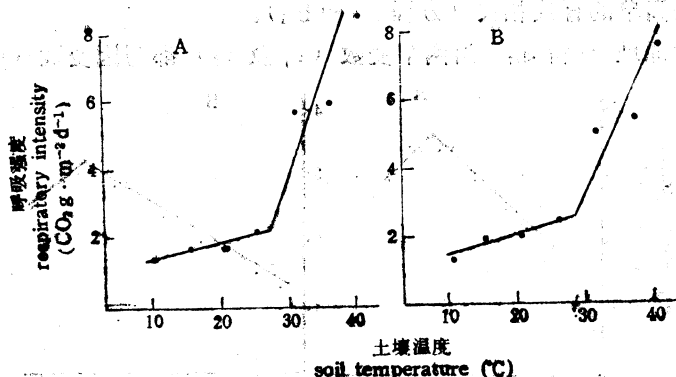


图1 不同土壤温度对呼吸强度的影响

Fig.1 The temperature effect to the respiratory intensity of different forest soil

A. 针叶林 coniferous forest

B. 阔叶林 broad-leaf forest

图1所示的呼吸强度与土温变化的关系，其数学表达通式为一对数方程：

$$\lg y = a + bx_1 \quad (I)$$

若将土温划分为两个区间，则可分别以两个简单的直线方程来表示：

$$y = a_1 + b_1 x_1 \quad (x_1 < 29^\circ\text{C}) \quad (I_1')$$

$$y = a_1' + b_1' x_1' \quad (x_1' > 29^\circ\text{C}) \quad (I_2')$$

### (二) 土壤水分对土壤呼吸强度的影响

在土柱温度为 25°C 条件下，土壤含水量 ( $x_2$ ) 的变化对土壤呼吸强度 ( $y$ ) 的影响从图2可见，针叶林和阔叶林土壤的呼吸强度，都随着土壤含水量的升高而增大，直至达到一定含水量以后，则随水分增高而减小，这个含水量的界限为该土样的田间持水量。

土壤呼吸与土壤含水量的这种关系，和 Parkinson 等人得到的结果<sup>[5]</sup>相一致。造成这种现象的原因是在田间持水条件下微生物的活性最大，呼吸强度最高，随着水分逐步降低或进一步升高到饱和、过饱和，造成缺氧，从而限制它们的生长活动，降低其呼吸强度。

图2显示的土壤呼吸与含水量关系的数学表达通式为二次抛物线方程：

$$y = a + bx_2 + cx_2^2 \quad (II)$$

如果将土壤含水量划分为两个区间，也可用两个简单的直线方程来表示：

$$y = a_2 + b_2 x_2 \quad (x_2 < \text{田间持水量}) \quad (II_1')$$

$$y = a_2' + b_2' x_2' \quad (x_2' > \text{田间持水量}) \quad (II_2')$$

### (三) 土壤呼吸与土壤水热条件的相关和回归

1. 土壤呼吸与水热条件的复相关关系 以上单因子模拟试验的结果表明，土壤呼吸与土壤温度的关系（方程 I）及与土壤含水的相关（方程 II）都是比较复杂的函数关系，但是对本区森林覆盖下的山地土壤来说，高于 29°C 的土壤温度及大于田间持水量的土壤含水，只是偶尔局部地，暂时地出现。实际观测结果表明，各月多次观测的平均值分别都在 29°C 和田间持水量以下，在这种条件范围内，土壤呼吸与土壤温度及土壤

含水的关系，都是简单的直线相关（方程 I' 和 II'）。

从有关统计学原理 [2] 得知：当两个变数 ( $x_1$  及  $x_2$ ) 都与因变数 ( $y$ ) 成直线相关

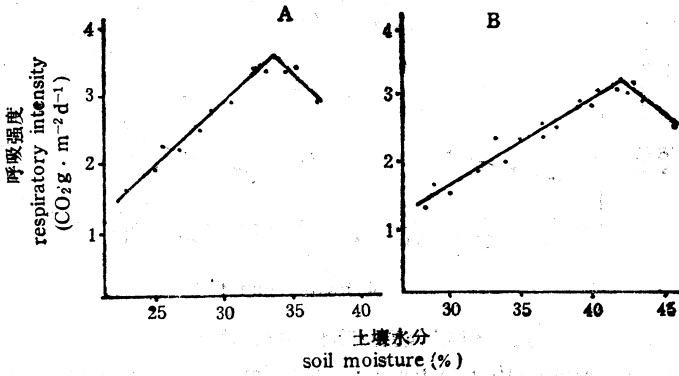


图2 不同林地土壤水分对呼吸强度的影响

Fig. 2 The moisture effect to the respiratory intensity of different forest soil

A. 针叶林 coniferous forest

B. 阔叶林 broad-leaf forest

时，它们之间复相关关系的数学式为：

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (III)$$

显然，从实际存在的一般条件来考虑，土壤呼吸（因变数  $y$ ）与土壤温度（变数  $x_1$ ）及土壤含水（变数  $x_2$ ）之间的复相关关系，也就可以用方程（III）来表述，式中常数  $a$  及  $b_1$ 、 $b_2$  可通过模拟试验，从不同呼吸强度及其相应的土壤温度和含水量数据，经统计计算得出。

表1 土壤呼吸水热效应模拟试验检测结果

Table 1 Data of simulated test for effects of temperature and moisture on the soil respiration

阔叶林土壤* broad-leaf forest soil			针叶林土壤 coniferous forest soil		
Y	$X_1$	$X_2$	Y	$X_1$	$X_2$
1.01	10.5	26.3	1.10	10.5	17.0
1.21	16.0	26.5	1.20	16.0	17.1
1.41	11.0	30.1	1.42	11.0	21.5
1.43	17.0	30.4	1.55	17.0	21.7
1.44	19.0	26.7	1.75	16.0	25.6
1.93	16.0	39.5	1.75	22.5	23.8
1.97	12.0	39.2	1.77	22.5	22.7
2.02	24.0	27.3	1.80	12.0	25.2
2.11	22.5	38.7	1.90	15.0	28.8
2.23	23.0	31.5	2.02	24.0	18.1
2.42	19.0	43.0	2.11	28.0	24.2
2.62	27.0	31.7	2.20	24.0	29.1
2.89	25.0	42.4	2.34	28.0	30.4
3.14	28.5	39.3	2.65	25.0	27.2
3.96	28.0	42.2	2.78	27.5	28.9

\* Y——土壤呼吸强度 respiratory intensity ( $\text{CO}_2 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$X_1$ ——温度 temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

$X_2$ ——水分 moisture (%)

2. 不同土壤呼吸与水热条件复相关的回归方程 根据模拟试验检测结果, 两种林地土壤发生不同呼吸强度相应的温度和水分含量列于表 1, 它综合反映了温度、水分两个因子共同作用下呼吸强度的变化。

由表 1 数据按有关数理统计方法<sup>[2]</sup>配得相应土壤的回归方程及其有关特征数列于表 2。通过对表 2 的分析, 可以看出配得方程的客观性和精密性。

(1) 两个方程回归系数标准值  $b'_1$  均大于  $b'_2$ , 说明温度比水分对呼吸强度起着更大的作用。这一点阔叶林比针叶林土壤更明显, 这是长期处在高郁闭度下, 对水分不很敏感的反映, 但回归系数标准差的显著性检验表明, 水分仍然是一个不可忽略的影响因素, 这一点针叶林土壤更是如此, 这是林被较稀对水分较为敏感所造成的。

(2) 两个方程的相关回归都有较高的显著性 (都  $>F_{0.01}$ ); 从回归剩余标准差估

表 2 土壤呼吸水热效应模拟试验的有关统计结果

Table 2 Statistical data from simulated test for the effects of temperature and moisture on soil respiration

土壤类型* soil type		阔叶林土壤 broad-leaf forest soil	针叶林土壤 coniferous forest soil
回归方程模式 model of regression equation		$Y=a+b_1X_1+b_2X_2$	$Y=a+b_1X_1+b_2X_2$
常数及回归系数 constant and regression coefficient	a	-1.688	-0.277
	$b_1$	0.083	0.043
	$b_2$	0.063	0.054
回归方程式 regression equation		$Y=0.083X_1+0.063X_2-1.688$	$Y=0.043X_1+0.054X_2-0.277$
回归系数标准化值 standardized regression coefficient	$b'_1$	0.6326	0.5636
	$b'_2$	0.5044	0.5001
回归系数标准差显著性 significance of regression coefficient's standard error	$tb_1$	6.370 ( $>t_{0.001}$ )	2.196 ( $>t_{0.05}$ )
	$tb_2$	4.318 ( $>t_{0.001}$ )	3.676 ( $>t_{0.01}$ )
回归剩余标准差 standard error of regression surplus $S_{\hat{y}}$		0.290	0.216
回归方程的显著性 significance of regression equation F		22.09 ( $>F_{0.01}$ )	13.04 ( $>F_{0.01}$ )

\* Y—土壤呼吸强度 respiratory intensity ( $\text{CO}_2\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ )

$X_1$ —温度 temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

$X_2$ —水分 moisture (%)

计, 回归计算值最大误差分别为 0.58 和 0.43  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ , 数值在野外实测复间最大误差 (0.3—1.0  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) 范围之内, 故认为应用回归方程进行预报计算, 其精度不亚于现场实测。

#### (四) 模拟计算值的校正

实地与模拟条件下测定的比较结果见表 3, 模拟试验土柱的温度及水分状况虽然与实地条件下完全相同, 但呼吸强度分别只有现场实测的 34.4% (阔叶林) 和 32.6% (针叶林)。这是由于土柱移实验室以后, 植物根系正常的呼吸已经消失 (它约占土壤总呼吸的 40% 左右<sup>[6]</sup>), 土体与外界环境的气体交换表面扩大 (除表面外还可向周围扩散) 造

成的。因此，室内模拟测得值要换算为现场实测值，还需作进一步的校正，据表 3 计得阔叶林和针叶林土壤的校正系数分别为 2.91 和 3.07。配出列于表 2 的模拟方程，用于

表 3 土壤呼吸强度模拟与现场检测值的比较

Table 3 Soil respiratory intensity of simulated test compared with that of tested on spot

检测采样地 site of test and sampling	阔叶林地 broad-leaf forest	针叶林地 coniferous forest
模拟检测值(A) value of simulated test	1.1415*	0.7675
现场检测值(B) value of tested on spot	3.3195	2.3624
(A)/(B)	0.344	0.326
(B)/(A)	2.91	3.07

\* 均为多次检测平均值 Both are the mean value of repeated test as  $\text{CO}_2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$

由土壤温度 ( $T$ ) 及土壤水分 ( $M$ ) 预报实地土壤呼吸强度 ( $R$ ) 时，阔叶林土壤 ( $R_1$ ) 和针叶林 ( $R_2$ ) 分别应为：

$$R_1 = (0.083T + 0.063M - 1.688) 2.91$$

$$R_2 = (0.043T + 0.054M - 0.277) 3.07$$

式中土壤呼吸强度 ( $R$ )，温度 ( $T$ ) 及水分 ( $M$ ) 的单位同前述，分别为  $\text{CO}_2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ， $^{\circ}\text{C}$  及 %。

#### 四、试验结果的效用与评价

##### (一) 模拟方程的应用效果

根据不同样方中 0—15cm 土层温度及水分逐旬观测数据的月平均呼吸强度，与不同季度实测结果的比较 (图 3)，说明预报值与实测值及其所反映的呼吸强度的年变化总趋

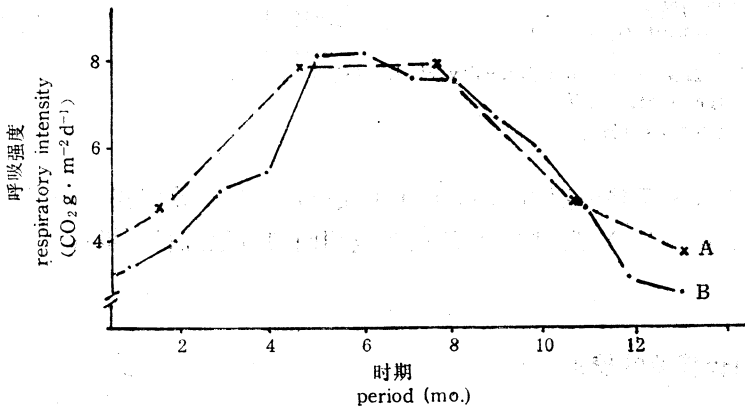


图 3 阔叶林土壤呼吸强度月变化的模拟与实测的比较

Fig. 3 The comparison of soil respiratory intensity change monthly from calculated and tested on the spot of the broad-leaf forest soil

A. 现场实测 tested on the spot B. 模拟计算 by the calculation

势近于一致。预报值与实测值的差异，是由于预报值得自较长时间的多次观测平均值，而实测值只是相近时期的一次测定，所以只能近似而不可能相同。冬期低温季节实测值均高于预报值，是因为实测工作均选在晴朗温暖天气进行，土温比同期实际平均温度为高所造成。不难设想，以较高频数的水热观测数据计算预报的土壤呼吸强度及其年中变化过程，较之每季度只作一次观测，不仅更详尽而且更为可信。

## (二) 预报值用于土壤物质能量转化的估量

有关研究已表明，土壤总呼吸中，除来自植物根系呼吸部分以外，余下的都是其他土壤生物（主要是微生物）呼吸的产物，它也是土壤这类生物体内部对含 C 有机物进行无机化分解的结果。得知土壤总呼吸及植物根系或微生物呼吸占有的份额，进一步根据微生物代谢过程对含 C 基质同化、异化的份额，也就可对土壤含 C 有机物和相应能量分解转化量作出定量计算（另文介绍）。其中计得阔叶林和针叶林被分解的有机物分别为  $10.56$  和  $10.00\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ；被转化的能量分别为  $5.28$  和  $5.00 \times 10^7 \text{ kcal}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ，除异化释放部分外，被同化利用留存于土壤的 C 素分别为  $1.85$  和  $1.75\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。这和根据微生物机体含 C 及它们仍消长更新速度计得土壤 C 素归还量分别为  $2.25$  和  $1.80\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$  大致近似而互相印证。

## (三) 有关方法的评价

国内有关森林生态系统研究中已有的土壤微生物和生化工作，大多未能满足有关定量化研究的需要。这一试验，是为实现这方面可能的模式化表述和定量化分析的结果之一。所表述的土壤呼吸水热效应规律及模拟方程预报的呼吸强度和物量分析，都能从已有的研究和实测结果中得到印证。由于这是新的尝试，考虑不周而有待完善之处尚属难免。尽管如此，它对推动和深化土壤、生态系统物质能量转化与平衡研究是有所裨益的。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 王德琼、邓邦权，1986：土壤空气中  $\text{CO}_2$  及土壤呼吸强度的野外现场比色测定。青年土壤科学工作者学术讨论会论文摘要集，第 64 页。
- [ 2 ] 范福仁，1982：生物统计学。江苏科技出版社，308—343。
- [ 3 ] 金沢晋二郎，1976：亚高山带针叶树林下の土壤有机物の性状と分解过程（第 3 報），本地域におけ互野外の土壤呼吸量について。日本土壤肥科学杂志，47（12）：549 页。
- [ 4 ] Drobnik, J., 1962: *Folia Microbiol.* 7: 126—140.
- [ 5 ] Parkinson D. et al., 1963: "Soil organism". (ed. by J. Doeksen et al.) 167—168.
- [ 6 ] Wagner, G.H. 著（岳莹王译），1984：微生物生长与碳素转化。见《土壤生物化学》（A.D. 麦克拉伦等编著，闵康九等译，1984，农业出版社），481—498 页。

# MATHEMATIC ANALOGUE AND PROGNOSIS OF THE EFFECTS OF TEMPERATURE AND MOISTURE ON SOIL RESPIRATION IN THE FOREST ECOSYSTEM OF DINGHU SHAN BIOSPHERE RESERVE

Deng Bangquan, Lú Lucheng and Wang Deqiong

(*Institute of Soil Science of Guangdong Province, Guangzhou 510650*)

## Abstract

On the basis of analyses of varied factors affecting the soil respiration, the simulated test for the effects of temperature and moisture on soil respiratory intensity was specially made. In which the general law of the change of soil respiratory intensity ( $Y$ ) depended on temperature ( $X_1$ ) and moisture ( $X_2$ ) was found. Further, according to their interrelationship under normal condition, the regression equation of respiratory intensity for the different soils was established. The value of  $Y$  for the broad-leaf forest soil and for the coniferous forest soil was  $(0.083X_1 + 0.063X_2 - 1.688) 2.91$  and  $(0.043X_1 + 0.054X_2 - 0.277) 3.07$  respectively.

In accordance with the regression equation, the respiratory intensities calculated with the data of temperature and moisture observed were roughly agreed with the value examined on same spot by one in every season.

This attempt opened up a new way for the calculation of the soil respiratory intensities and their change using the data from successive observation of soil temperature and moisture.

**Key words:** Forest soil; Soil respiration; Mathematic analogue