

不同季节强碱土土壤呼吸影响因子分析与模型预测

张 录¹,张 芳^{1,2},熊黑钢^{1,3},段鹏程¹,李荣荣¹,张 南¹

(1.新疆大学资源与环境科学学院,教育部绿洲生态重点试验室,新疆 乌鲁木齐 830046;
2.新疆大学生态学博士后流动站,新疆 乌鲁木齐 830046; 3.北京联合大学应用文理学院,北京 100191)

摘 要: 利用 LI-8100 土壤碳通量测量仪测定了春夏秋三季晴朗天气下强碱土土壤呼吸速率、温度(气温和地温)、湿度(空气相对湿度和土壤湿度)数据,分析了它们之间的相关关系,获得不同季节对土壤呼吸影响较大的因子,并建立不同类别的多种回归模型;在精度检验及简单易行原则基础上,得到各季节土壤呼吸预测的最优模型。结果表明:(1)虽然温湿度均是影响不同季节强碱土土壤呼吸的主要因素,但均以温度的影响较大,其中气温是春秋两季土壤呼吸的最大直接影响因子,地温是夏季的最大直接影响因子,而土壤湿度为各季节最大的间接影响因子。(2)春秋两季土壤呼吸的最佳预测模型均为 10 cm 处气温和土壤湿度所建的双因子方程,该方程具有较小的均方根误差(RMSE)(分别为 0.159 和 0.259),且相对分析误差(RPD)>2(分别为 2.9、2.094),具有非常好的预测能力。夏季土壤呼吸最佳预测模型则为包含 10 cm 处气温、地温、空气相对湿度和土壤湿度所建的 4 因子方程,RMSE 为 0.248,RPD>2(为 2.406),可用于精确预测。(3)各季节土壤呼吸变化趋势与其影响因子的变化,因春季的完全同步,夏季基本一致,而秋季一致性较差,故春季土壤呼吸最佳预测模型的预测精度最高(92.67%),夏季次之(84.99%),秋季较差(77.23%)。

关键词: 强碱土;土壤呼吸;影响因子;预测模型
中图分类号: S154.1 **文献标志码:** A

Impact factor analysis and model prediction of strong alkaline soil respiration in different seasons

ZHANG Lu¹, ZHANG Fang^{1,2}, XIONG Hei-gang^{1,3}, DUAN Peng-cheng¹, LI Rong-rong¹, ZHANG Nan¹

(1. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University/Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830046, China;
2. Ecology Post-doctoral Research Station, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;
3. College of Arts and Sciences of Beijing Union University, Beijing 100191, China)

Abstract: In this paper, strong alkaline soil respiration rate has been measured in spring, summer, autumn under sunny weather condition by using LI-8100 soil carbon flux meter, temperature (air temperature and soil temperature), humidity (relative humidity and soil moisture) were also recorded simultaneously, and the correlation among above factors has been analyzed to identify the key factors influencing soil respiration in different season, and establish a variety of regression models. On the basis of the accuracy test and simple principle, the optimal model to predict the seasonal soil respiration has been selected. The results show that: (1) Although the temperature and humidity are the main factors affecting strong alkaline soil respiration in different seasons, but the temperature has relatively larger effect, where the air temperature is the biggest direct impact factor on soil respiration in spring and autumn, while in summer, the soil temperature is the greatest direct impact factor, and soil moisture is the largest indirect factor in all season. (2) The best prediction model of soil respiration in spring and autumn is the two-factor equation composed of air temperatures at 10 cm

收稿日期:2016-01-25
基金项目:国家自然科学基金(41261049、41171165);中国博士后科学基金(2013M532100);北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(IDHT20130322)
作者简介:张 录(1989—),男,陕西汉中,人,硕士,主要从事干旱区环境研究。E-mail:zhanglu1356@126.com。
通信作者:张 芳(1969—),女,山东嘉祥人,副教授,主要从事干旱区环境与入地关系的研究。E-mail:zhangf602@163.com。

layer and soil moisture, which has a smaller *RMSE* (0.159 and 0.259, respectively), and the *RPD* > 2(2.9, 2.094, respectively), has a better predictive accuracy. The best soil respiration predictive model for summer season is composed of air temperature at 10 cm, surface temperature, relative humidity and soil moisture, *RMSE* is 0.248, *RPD* > 2(of 2.406). (3) The trend of soil respiration variation and their impact factors was similar in spring, but different in summer and autumn. In spring the soil respiration model has the highest prediction accuracy (92.67%), followed by summer (84.99%) and poor in fall (77.23%).

Keywords: strong alkaline soil; soil respiration; impact factor; prediction model

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要环节,是土壤碳素向大气输出的主要途径^[1-2]。土壤碳库的较小变动即会显著改变大气中 CO₂ 浓度和土壤碳沉积速率^[3]。干旱半干旱区生态环境脆弱,具有极端的非生物生态因子,该区域土壤有机碳含量偏低,土壤呼吸对温度与水分变化极为敏感,因此成为衡量区域气候变化的重要指标之一^[4]。对于土壤呼吸的影响因子研究较多,尤其以温度和水分较为突出,了解这些因子与土壤呼吸之间的关系,对于区域碳循环的估计和预测有重要意义。温度是调节和控制许多生态学过程的关键因素,也是影响土壤呼吸的决定性因子之一。土壤呼吸与温度间的拟合方式较多,主要有线性方程^[5]、指数方程^[6]、Arrhenius 方程^[7]、幂函数方程^[8]和逻辑斯蒂方程^[9]。水分对土壤呼吸的影响也很重要,与土壤呼吸存在着不同的相关关系,拟合方式主要有线性方程^[10-12]、三次曲线模型^[13]等。对于干旱半干旱区土壤呼吸及影响因子的研究多集中在森林、沙漠、农田等^[14-17],而强碱土土壤呼吸的影响因子分析及建立估测模型的相关研究相对较少。本文以干旱区强碱土为研究对象,通过分析春、夏、秋季土壤呼吸与其同步所测定的温湿度气象因子的相关关系,找出不同季节强碱土土壤呼吸日变化的主要影响因子,以此建立估测模型,并以简单易行为原则,选出各季节最佳模型,为干旱区碳储量的快速估测提供参考依据。

1 研究区概况

研究区位于天山山脉东段北坡与准噶尔盆地东南缘地区过渡地带的新疆奇台县草原站(44°04′42.62″N, 89°53′24.81″E),海拔 791 m,处于中部冲积平原区,属于中温带大陆性干旱半干旱气候,年平均气温 4.7℃,年平均降水量 176 mm,蒸发潜力 2 141 mm,年日照时数 2 280 ~ 3 230 h。这里存在大面积碱化土壤,在准噶尔盆地东南缘范围内具有很强的代表性。

2 材料与方法

2.1 样地选择及土壤性质

奇台县平原区东部草原站土壤碱化情况严重且面积较大,在此区域内采用梅花桩采样法,设 5 个样点,取 0 ~ 20 cm 土层土样,混合均匀,得到均一土样。其所含基本成分由中国科学院新疆生态与地理研究所专业土壤分析人员测定,基本土壤性质如下: pH 值范围在 10 以上,有机质含量极低,约为 2.5 g·kg⁻¹,电导率的范围在 3.34 ~ 4.57 ms·cm⁻¹之间(表 1)。根据中国土壤地理发生学分类和系统分类近似参比^[18]及碱化土壤分级相关研究结果^[19],样区土壤属于强碱土(碱积盐成土),本文以此为研究对象,在地势平坦,避开农田、居民点和道路等人为影响的区域进行试验。

表 1 土壤基本性质
Table 1 The properties of tested soil

土层/cm Soil layer	碳酸钙 Calcium carbonate /(g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	pH 1:5	电导率 Electronic conductivity /(ms·cm ⁻¹)	在总盐中的比例/% The ratio of each ion in total salt							
					CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
0 ~ 5	84.71	2.57	10.31	4.57	14.38	4.61	13.71	28.09	0.26	0.11	0.38	34.38
5 ~ 20	81.01	2.44	10.28	3.34	19.47	7.99	18.3	14.15	0.53	0.21	0.46	35.33

2.2 土壤呼吸和温湿度的测定

在样地内设置一个土壤呼吸环(因 5 个样点的土壤理化性质差异不明显,设置 1 个呼吸环可代表整个研究对象),即直径 20 cm,高 20 cm 的 PVC 管,

将其置入土中,露出地表约 3 cm。为避免安置 PVC 管对土壤呼吸速率造成短时间的扰动,需静置 24 h 待其平衡。利用开路式土壤碳通量测量仪 LI-8100 (LI-COR, USA)每 1 h 自动测 1 次土壤呼吸速率(每

3.2 土壤呼吸影响因子的通径分析

为进一步分析各季节土壤呼吸与其影响因子的关系,使用通径分析方法,对比其通径系数绝对值的大小来找出最大的直接和间接影响因子(表 3)。气温对强碱土春、秋季节土壤呼吸的直接作用最大(1.5735、2.3722),而对夏季土壤呼吸直接作用最大的因子是地温(− 2.7964)。

对比间接通径系数,春、秋季的土壤湿度与空气

相对湿度的间接作用均较大(− 1.4809 和 1.5119、− 2.2611 和 2.3275),且均通过气温起间接作用。而夏季气温、空气相对湿度、土壤湿度的间接作用亦较大(− 2.4114、2.5718、− 2.7123),均通过地温来影响。土壤湿度是影响春、夏、秋季土壤呼吸的最大间接因子。此外,各季节所选的这些较大间接通径系数均与其最大直接通径系数在同一量级,表明其它因子的间接作用对于土壤呼吸的影响也大。

表 2 温度、湿度与土壤呼吸的相关关系				
Table 2 Correlation coefficients between soil respiration rate, temperature and humidity				
季节 Season	气温 Air temperature	地温 Ground temperature	空气相对湿度 Air relative humidity	土壤湿度 Soil moisture
春季 Spring	0.923 * *	0.428 *	− 0.807 * *	0.806 * *
夏季 Summer	− 0.523 * *	− 0.748 * *	0.595 * *	− 0.691 * *
秋季 Autumn	0.669 * *	0.004	− 0.515 * *	0.572 * *

注 (Note): * *: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$ 。

表 3 各季节土壤呼吸影响因子的通径分析						
Table 3 Path analysis on soil respiration influencing factors in each season						
季节 Season	因子 Factor	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect			
			T_1	T_2	RH	X
春季 Spring	T_1	1.5735		− 0.3129	− 0.3419	0.0046
	T_2	− 0.4383	1.1233		− 0.2612	0.0040
	RH	0.3632	− 1.4809	0.3152		− 0.0044
	X	0.0047	1.5119	− 0.3733	− 0.3370	
夏季 Summer	T_1	0.5438		− 2.4114	0.4250	0.9195
	T_2	− 2.7964	0.4689		0.4519	1.1282
	RH	− 0.4913	− 0.4704	2.5718		− 1.0150
	X	1.1631	0.4299	− 2.7123	0.4287	
秋季 Autumn	T_1	2.3722		− 0.3418	− 0.2634	− 1.0978
	T_2	− 0.5300	1.5299		− 0.2097	− 0.7857
	RH	0.2763	− 2.2611	0.4022		1.0674
	X	− 1.1189	2.3275	− 0.3722	− 0.2636	

注: T_1 —气温, T_2 —地温, RH —空气相对湿度, X —土壤湿度,下同。
Note: T_1 —air temperature, T_2 —ground temperature, RH —air relative humidity, X —soil moisture. The same below.

通径分析结果与上述相关分析的结论一致,更进一步表明温度因子是各季节强碱土的最主要影响因素,但温湿度的耦合作用对于它的影响也不可忽略。

3.3 模型建立

3.3.1 单因子最优模型 选取各季节与土壤呼吸的相关系数最大的因子建立线性、幂函数、指数、负指数、双曲线、对数、二阶、三阶函数模型进行对比,在此仅列出 $R^2 \geq 0.5$,且 P 为 0.000 的模型(表 4)。春季的 Y_{a1} 、 Y_{a6} 、 Y_{a7} 方程的 R^2 均达到了 0.86 以上,但后两者比前者仅大 0.011 和 0.022,其差距不明显,且方程更复杂,所以 Y_{a1} 方程为春季土壤呼吸预

测的最佳单因子模型。同理,夏季的 Y_{b1} 和秋季的 Y_{c1} 方程,均具有较大的 R^2 ,且更简单易操作,所以二者为两季节土壤呼吸预测的最佳单因子模型。同时,这反映出气温不仅是影响春、秋季强碱土土壤呼吸的最主要因子并且两者呈线性关系,而夏季强碱土的土壤呼吸最主要影响因子则为地温。上述单因子模型,春季的 R^2 达到 0.8,夏、秋季的 R^2 均达到 0.5 以上,虽然温度是影响各季节土壤呼吸的主要因素,但是夏、秋季模型 R^2 仍然较低。可见湿度因素的作用不可忽略,土壤呼吸是受温、湿度共同控制的,需将二者共同引入建立方程。

表 4 单因子土壤呼吸预测模型
Table 4 Single factor forecasting model for soil respiration

季节 Season	模型 Model	回归方程 Regression equation	R^2	P
春季 Spring	线性函数 Linear function	$Y_{a1} = 0.0906T_1 - 1.3413$	0.867	0.000
	幂函数 Power function	$Y_{a2} = 0.0001T_1^{4.6569}$	0.570	0.000
	负指数函数 Negative exponential function	$Y_{a3} = 37.1195\exp(-91.4085/T_1)$	0.589	0.000
	双曲线函数 Hyperbolic function	$Y_{a4} = 1.2611 - 14.8465/T_1$	0.692	0.000
	对数函数 Logarithmic function	$Y_{a5} = 1.2719\ln T_1 - 3.2828$	0.803	0.000
	二阶多项式函数 Second-order polynomial function	$Y_{a6} = 0.0021T_1^2 + 0.0205T_1 - 0.8712$	0.878	0.000
	三阶多项式函数 Third-order polynomial function	$Y_{a7} = -0.0004T_1^3 + 0.0204T_1^2 - 0.2515T_1 + 0.3259$	0.889	0.000
夏季 Summer	线性函数 Linear function	$Y_{b1} = -0.1474T_2 + 3.7156$	0.572	0.000
	双曲线函数 Hyperbolic function	$Y_{b2} = -4.1079 + 102.4634/T_2$	0.590	0.000
	对数函数 Logarithmic function	$Y_{b3} = -3.9077\ln T_2 + 12.5900$	0.582	0.000
	二阶多项式函数 Second-order polynomial function	$Y_{b4} = 0.0129T_2^2 - 0.8287T_2 + 12.6250$	0.596	0.000
	三阶多项式函数 Third-order polynomial function	$Y_{b5} = -0.0047T_2^3 + 0.3305T_2^2 - 9.1617T_2 + 84.9690$	0.609	0.000
秋季 Autumn	线性函数 Linear function	$Y_{c1} = 0.0529T_1 - 1.0704$	0.505	0.000
	对数函数 Logarithmic function	$Y_{c2} = 0.9891\ln T_1 - 2.8976$	0.511	0.000
	二阶多项式函数 Second-order polynomial function	$Y_{c3} = -0.0017T_1^2 + 0.1219T_1 - 1.6680$	0.517	0.000
	三阶多项式函数 Third-order polynomial function	$Y_{c4} = -0.0002T_1^3 + 0.0113T_1^2 - 0.1201T_1 - 0.2849$	0.524	0.000

注: Y —土壤呼吸速率,下同。 Note: Y —soil respiration rate. The same below.

3.3.2 多因子最优模型 利用线性拟合分析将各季节与土壤呼吸相关性达到极显著水平的因子进行多因子建模(表 5)。因变量为实测土壤呼吸速率,自变量为同步所测的气温、地温、空气相对湿度和土壤湿度。所有模型均通过 $P < 0.01$ 检验,即模型均有效。

春、秋季所建的模型中,除 Y_{a9} 、 Y_{c7} 模型 R^2 (0.779和 0.415)明显小于两季节所选的最优单因子方程 R^2 (0.867 和 0.505)外,其余方程的 R^2 随建模因子的增多而明显提高。可见,由湿度因子建立的模型精度差,表明湿度不是影响土壤呼吸的主要因子,而气温是最主要的影响因子,它与湿度共同建立的模型更好,即精度更高。

夏季的 Y_{b7} 、 Y_{b8} 、 Y_{b11} 、 Y_{b14} 方程 R^2 低于土壤呼吸与地温所建的最佳单因子方程 R^2 (0.572),而其余方程 R^2 则随建模因子的增多而明显提高。可见,气温和湿度因子建模,以及湿度因子独立建模,精度均较差。地温因子参与建模,方程精度均较高,表明其是影响夏季土壤呼吸的最主要因子,且加入其它因素后模型更好。

将春、夏、秋季 R^2 最高的多因子模型(Y_{a11} 、 Y_{b16} 、 Y_{c8})与所选最佳单因子模型(Y_{a1} 、 Y_{b1} 、 Y_{c1})对比,从 R^2 的大小来看,多因子模型比单因子模型分别高 0.12、0.279、0.309。这反映出,不论哪个季节

温、湿度的耦合控制了强碱土的土壤呼吸。

3.4 模型选择与精度检验

将选取的最优单因子、多因子模型进行精度检验并对比分析(表 6)。春季所选的 3 个方程,其 RPD 均大于 2,都可对强碱土土壤呼吸做精确的预测。从 R^2 来看, Y_{a1} 方程拟合优度明显较低,而另外两模型的 R^2 较大,且相差不大,但是双因子 Y_{a10} 模型更简便易行, $RMSE$ 最小(0.159), RPD 最大(2.9),其有更好的预测能力,是春季土壤呼吸日变化的最佳预测模型。此外, Y_{a1} 方程反映出气温是决定春季强碱土土壤呼吸估测模型精度的最主要因子,也可以直接用来预测春季土壤呼吸。 Y_{a10} 方程在气温的建模基础上加入了土壤湿度因子,模型预测精度进一步提升,但在此基础上加入了空气相对湿度因子的 Y_{a11} 方程,其预测精度(RPD)降低,这因为空气相对湿度的日际变化大,没有气温和土壤湿度的日际变化稳定,它的参与降低了预测模型的精度。

夏季的 Y_{b1} 、 Y_{b6} 、 Y_{b13} 、 Y_{b16} 方程较优,其中地温是决定夏季强碱土土壤呼吸预测模型精度的最主要影响因子,但是只能做粗略的估测。随着建模因子的增加, R^2 不断增大(分别为 0.572、0.643、0.768、0.851)。与前者的 R^2 相比,后三者方程 R^2 分别增加了 0.071、0.196、0.279。从 4 个方程的精度检验

结果可看出, $RMSE$ 随建模因子的增加不断变小, 且 RPD 不断增大, 4 个因子共建的方程 Y_{b16} 具有最小的 $RMSE$ 和最大的 RPD (2.406), 其是夏季土壤呼吸日变化的最优模型, 可做精确预测。这表明除地温外, 其它 3 个因子的间接作用也较大, 这与通径分析结果一致。

表 5 各季节土壤呼吸与温、湿度模型
Table 5 The model of soil respiration and temperature and humidity for seasons

季节 Season	回归方程 Regression equation	R^2	P
春季 Spring	$Y_{a8} = 0.2208 T_1 + 0.0676 RH - 5.5668$	0.937	0.000
	$Y_{a9} = -0.0818 RH - 0.5230 X + 13.9541$	0.779	0.000
	$Y_{a10} = 0.1994 T_1 - 0.7546 X + 13.1578$	0.980	0.000
	$Y_{a11} = 0.2296 T_1 + 0.0256 RH - 0.6220 X + 9.0085$	0.987	0.000
夏季 Summer	$Y_{b6} = 0.0435 T_1 - 0.2362 T_2 + 4.8993$	0.643	0.000
	$Y_{b7} = 0.0082 T_1 + 0.0288 RH - 1.2075$	0.377	0.007
	$Y_{b8} = 0.0112 T_1 - 0.4555 X + 5.0396$	0.508	0.000
	$Y_{b9} = -0.2800 T_2 - 0.0300 RH + 8.0672$	0.639	0.000
	$Y_{b10} = -0.3269 T_2 + 0.5229 X + 2.1255$	0.604	0.000
	$Y_{b11} = -0.0029 RH - 0.4293 X + 5.1011$	0.502	0.000
	$Y_{b12} = 0.0310 T_1 - 0.3026 T_2 - 0.0208 RH + 7.5742$	0.669	0.000
	$Y_{b13} = 0.0758 T_1 - 0.7091 T_2 + 1.1861 X + 2.1710$	0.768	0.000
	$Y_{b14} = 0.0138 T_1 + 0.0027 RH - 0.4374 X + 4.6766$	0.509	0.002
	$Y_{b15} = -0.7385 T_2 - 0.0493 RH + 1.0882 X + 7.5499$	0.750	0.000
秋季 Autumn	$Y_{b16} = 0.0613 T_1 - 0.9563 T_2 - 0.0383 RH + 1.4993 X + 6.3802$	0.851	0.000
	$Y_{c5} = 0.1703 T_1 + 0.0713 RH - 5.4647$	0.695	0.000
	$Y_{c6} = 0.2798 T_1 - 1.2743 X + 15.6506$	0.737	0.000
	$Y_{c7} = 0.0258 RH + 0.4947 X - 9.0125$	0.415	0.003
	$Y_{c8} = 0.3074 T_1 + 0.0487 RH - 0.9799 X + 8.7892$	0.814	0.000

秋季 3 个模型的 R^2 相比, Y_{c6} 、 Y_{c8} 比 Y_{c1} 分别增加了 0.232 和 0.309, 但前者比后者仅小 0.077, 同时其 $RMSE$ 最小, RPD 最大, 为 2.094, 且其为双因子模型, 更简单, 所以选择 Y_{c6} 方程为秋季土壤呼吸日变化的最佳估测模型。 Y_{c1} 所建立的最主要影响因子(气温)模型, 不能对土壤呼吸进行粗略预测, 但 Y_{c6} 模型中加入土壤湿度因子, 就具有很高的预测精度, 说明土壤湿度对于秋季土壤呼吸有重要的作用。 Y_{c8} 模型在加入空气相对湿度因子后, 其预测精度较 Y_{c6} 差, 这与春季相同。

3.5 各季节最佳预测模型对比及影响因子分析

将春、夏、秋季土壤呼吸日变化的最佳预测模型 Y_{a10} 、 Y_{b16} 和 Y_{c6} 所计算的预测值与实测值作图以及方程拟合(图 1)。可看出, 春季的实测与预测土壤呼吸值吻合最好, 其方程的决定系数 R^2 最大(0.9267), 夏季次之($R^2 = 0.8499$), 秋季较差($R^2 = 0.7723$)。

由于春季融雪及冻土解融后, 土壤湿度大, 有利于表层土壤碳酸盐(CaCO_3 、 Na_2CO_3 等)吸收 CO_2 , 其反应生成的重碳酸盐($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 NaHCO_3 等)在白天气温升高(气温低于 20°C)状态下分解释放, 而夜间(9:00—次日 8:00)低温下又缓慢吸收, 土壤呼吸日变化与气温、土壤湿度日变化的趋势完全一致(均在 13:00 左右达到最大, 夜间一致降低), 线性方程可很好地拟合它们之间的关系, 模型精度最高。

夏季气温、地温、土壤湿度变化曲线与土壤呼吸变化相反(3 因子均在 16:00 左右达到最大值, 而土壤呼吸早 1 h 达到最小值, 夜间时段其随三者的降低而增大), 而空气相对湿度变化则与其变化基本一致。在 9:00—15:00 时段土壤呼吸随地温的升高而降低(因温度高, 其气温、地温分别在 35°C 、 30°C 左右, 土壤湿度在 11% 左右, 高温加速了碳酸盐与 CO_2 的化学反应速率, 吸收 CO_2), 而 16:00—21:00 时段则随温度的降低而增大(温度降低, 使得土壤中化学反应变慢, 消耗 CO_2 的量减少)。各影响因子与土壤呼吸的变化大致同步, 故模型的精度较低。

而秋季土壤呼吸日变化在 11:00—15:00 时段与气温、土壤湿度变化完全相反, 但在其它时段却变化一致(此时段气温较高, 其接近 30°C , 加之土壤湿度较大, 有利于近地表土壤中碳酸盐与 CO_2 的反应吸收)。其影响因子与土壤呼吸的变化一致性最差, 模型精度也最低。

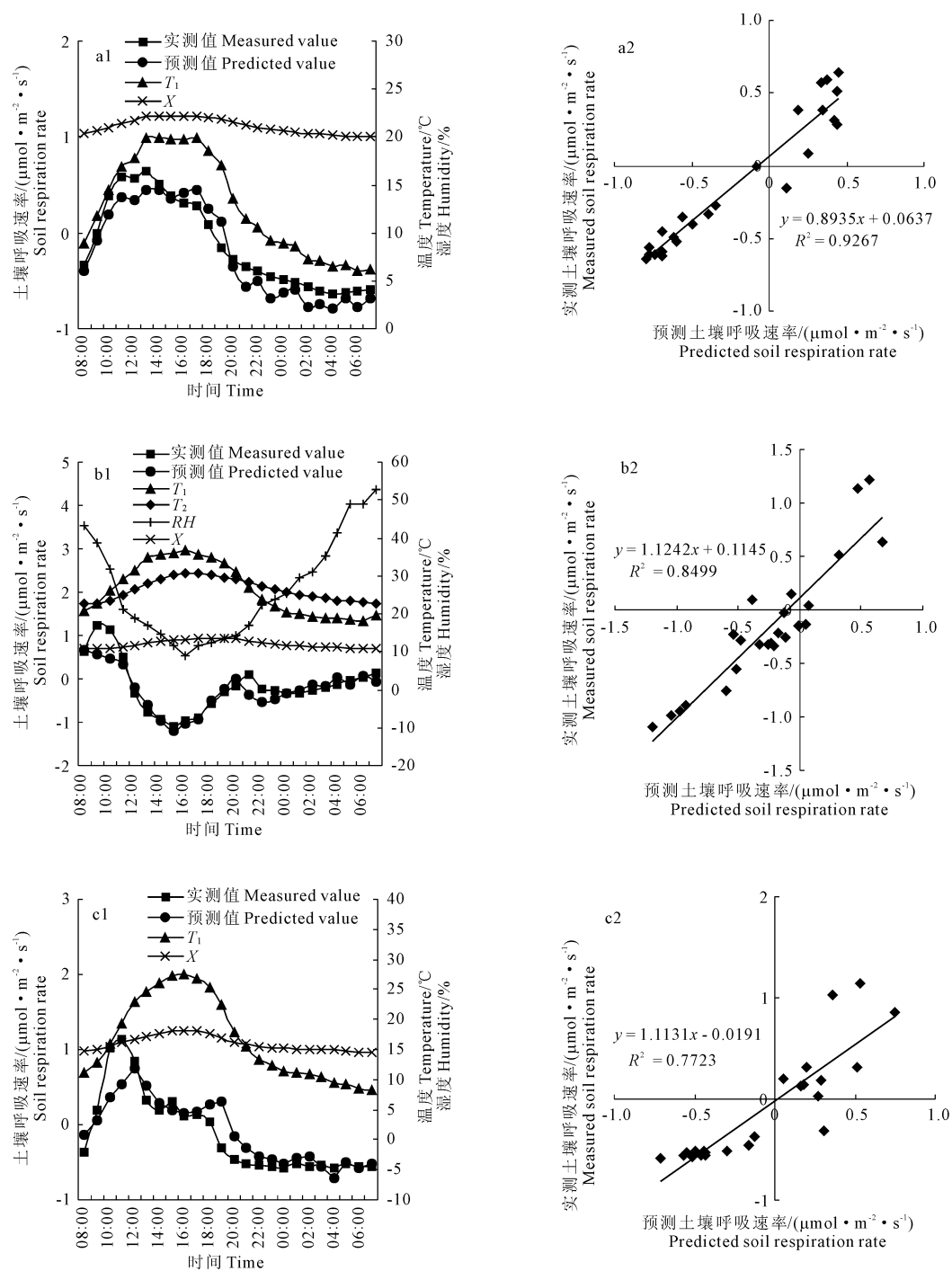


图 1 实测与预测土壤呼吸速率的对比及模型拟合(a1、a2:春季;b1、b2:夏季;c1、c2:秋季)

Fig.1 The comparisons and model fitting of soil respiration rate between the measured and predicted values
(a1, a2: Spring; b1, b2: Summer; c1, c2: Autumn)

4 结 论

1) 春、秋季强碱土土壤呼吸与气温、空气相对湿度和土壤湿度均达到了极显著相关,与气温的相关性最强。夏季土壤呼吸与温、湿度四因子均存在极显著的相关关系,与地温的相关性最高。通径分析表明,气温是春、秋季土壤呼吸的最大直接影响因

子,夏季则为地温因子,且均以土壤湿度间接作用最大。温、湿度的耦合控制土壤呼吸变化。

2) 各季节土壤呼吸与相关性最大因子所建的 8 种模型中,以线性模型为最佳,均具有较大 R^2 ,且简便易操作。随着建模因子的增加,多因子模型 R^2 基本上不断增大,但单独的湿度因子所建模型精度均较差。

表 6 土壤呼吸估测模型的精度检验

Table 6 The precision test of soil respiration predicting models

季节 Season	回归方程 Regression equation	R^2	RMSE	RPD
春季 Spring	$Y_{a1} = 0.0906T_1 - 1.3413$	0.867	0.203	2.273
	$Y_{a10} = 0.1994T_1 - 0.7546X + 13.1578$	0.980	0.159	2.900
	$Y_{a11} = 0.2296T_1 + 0.0256RH - 0.6220X + 9.0085$	0.987	0.173	2.664
夏季 Summer	$Y_{b1} = -0.1474T_2 + 3.7156$	0.572	0.394	1.514
	$Y_{b6} = 0.0435T_1 - 0.2362T_2 + 4.8993$	0.643	0.372	1.604
	$Y_{b13} = 0.0758T_1 - 0.7091T_2 + 1.1861X + 2.1710$	0.768	0.336	1.776
	$Y_{b16} = 0.0613T_1 - 0.9563T_2 - 0.0383RH + 1.4993X + 6.3802$	0.851	0.248	2.406
秋季 Autumn	$Y_{c1} = 0.0529T_1 - 1.0704$	0.505	0.432	1.257
	$Y_{c6} = 0.2798T_1 - 1.2743X + 15.6506$	0.737	0.259	2.094
	$Y_{c8} = 0.3074T_1 + 0.0487RH - 0.9799X + 8.7892$	0.814	0.301	1.803

3) 在简单易行的原则下,春、秋季土壤呼吸的最佳预测模型均为 10 cm 处气温和土壤湿度所建的双因子方程。夏季最佳预测模型则为与 10 cm 处气温、地温、空气相对湿度和土壤湿度所建的 4 因子方程。

4) 各季节土壤呼吸最佳预测模型,春季的预测精度最高 ($R^2 = 0.9267$),夏季次之 ($R^2 = 0.8499$),秋季较差 ($R^2 = 0.7723$)。

参 考 文 献:

[1] Schimel DS. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. Global Change Biology, 1995,1(1):77-99.

[2] Schlesinger WH, Andrews JA. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000,48(1):7-20.

[3] Davidson EA, Trumbore SE, Amundson R. Biogeochemistry: soil warming and organic carbon content[J]. Nature, 2000,408(6814):789-790.

[4] 王新源,李玉霖,赵学勇,等.干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J].生态学报,2012,32(15):4890-4901.

[5] Chimner RA. Soil respiration rates of tropical peat lands in Micronesia and Hawaii[J]. Wetlands, 2004,24(1):51-56.

[6] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in Picea abies stands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000,32(11/12):1625-1635.

[7] Thierron V, Laudelout H. Contribution of root respiration to total CO₂ efflux from the soil of a deciduous forest[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1996,26(7):1142-1148.

[8] Fang C, Moncrieff JB. The dependence of soil CO₂ efflux on tempera-

ture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001,33(2):155-165.

[9] Rodeghiero M, Cescatti A. Main determinants of forest soil respiration along an elevation temperature gradient in the Italian Alps[J]. Global Change Biology, 2005,11(7):1024-1041.

[10] 黄 湘,李卫红,陈亚宁,等.塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因子[J].生态学报,2007,27(05):1951-1959.

[11] 张丁辰,蔡典雄,代 快,等.旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J].生态学报,2013,33(6):1916-1925.

[12] 康永祥,夏国威,刘建军,等.秦岭小陇山锐齿栎林皆伐迹地土壤呼吸特征[J].应用生态学报,2014,25(2):342-350.

[13] 黄 湘,陈亚宁,李卫红,等.塔里木河中下游柽柳群落土壤碳通量及其影响因子分析[J].环境科学,2006,27(10):1934-1940.

[14] 张丽萍,陈亚宁,李卫红,等.准噶尔盆地盐穗木群落土壤 CO₂ 释放规律及其影响因子[J].干旱区研究,2007,24(6):6854-6860.

[15] 杨建军,吕光辉,张 燕,等.艾比湖流域不同植物群落土壤呼吸研究[J].环境科学研究,2009,22(3):362-370.

[16] 周洪华,李卫红,杨余辉,等.干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素[J].地理科学,2011,31(2):190-196.

[17] 张丽华,陈亚宁,李卫红,等.干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸[J].生态学报,2008,28(5):1911-1922.

[18] 海春兴,陈健飞.土壤地理学[M].北京:科学出版社,2010.

[19] 张 芳,熊黑钢,安放舟,等.基于盐(碱)生植被盖度的土壤碱化分级[J].土壤学报,2012,49(4):665-672.

[20] 唐启义. DPS 数据处理系统[M].北京:科学出版社,2010.

[21] Chang C W, Laird D A. Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N[J]. Soil Science, 2002,167(2):110-116.