

网络出版时间:2014-05-28 11:34

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.06.009

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.06.009.html

黄土丘陵区刺槐林土壤碳通量模拟研究

董莉茹¹,许明祥²,孙 会³

(1 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100;2 中国科学院水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;3 中国科学院水土保持研究所 安塞水土保持综合试验站,陕西 安塞 717400)

[摘要] 【目的】研究黄土丘陵区刺槐林不同土层土壤碳通量,以准确评估该区域土壤碳排放量。【方法】以坡耕地(对照)以及 10,20,30 和 40 年生的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林为研究对象,用气体井法测定 CO₂ 浓度,使用 Fick 扩散法(5 种扩散系数模型)计算 0~200 cm 土层土壤剖面碳通量,并用 Li-8100 腔室法对表层土壤碳通量进行实地监测,最后将黄土丘陵区刺槐林地不同深度土层土壤碳通量的估算结果与实测值进行对比分析。【结果】1) 5 种扩散系数模型对土壤剖面碳通量的模拟结果有较大差异,其中 Penman 模型计算结果与实测值差异最大,Moldrup 模型计算值与实测值差异最小。2) 5 种扩散系数模型计算的土壤碳通量均大于实测值,但与实测值均具有显著相关性($P < 0.05$)。3) 在黄土丘陵区刺槐林地 0~20,80~140,200 cm 土层估算土壤碳通量的最佳扩散系数模型分别为 Moldrup-2000、Moldrup-1997 和 Millington 模型。4) 在黄绵土 0,20,80,140,200 cm 土层,土壤 CO₂ 扩散系数分别为 0.15,0.14,0.20,0.22 和 0.27,据此计算的各土层土壤碳通量分别为 0.72,0.32,0.30,0.24 和 0.17 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,可见随着土层深度的增加,土壤碳通量逐渐降低。【结论】黄土丘陵区不同刺槐林地各土层的环境因子有一定差异,所以估算不同深度土壤碳通量的最佳模型有所区别;研究确定的黄土区不同土层碳通量估算模型和气体扩散系数模型中的各种参数,对于准确评估区域土壤碳排放具有重要参考价值。

[关键词] 黄土丘陵区;刺槐林地;土壤碳通量模型;扩散系数

[中图分类号] S153.6⁺1;S792.26

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)06-0122-09

Modeling soil CO₂ flux of *Robinia pseudoacacia* woodland in the Loess Hilly Region

DONG Li-ru¹, XU Ming-xiang², SUN Hui³

(1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Institute of Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Comprehensive Test Station of Soil and Water Conservation in Ansai, Institute of Chinese Academy of Sciences, Ansai, Shaanxi 717400, China)

Abstract: 【Objective】 This study explored the carbon fluxes at different soil layers of *Robinia pseudoacacia* woodland in the Hilly Loess Region, to accurately assess soil carbon emissions in this region. 【Method】 Crop land (the control) and black locust (*Robinia pseudoacacia*) woodlands with different ages (10, 20, 30, and 40 years) were selected. CO₂ concentration in each soil layer was measured by gas-well method, CO₂ flux of 0—200 cm soil profile was calculated using Fick diffusion method, and Li-8100 chamber method was used to monitor the surface soil carbon flux. At last, the predicted and measured soil car-

[收稿日期] 2014-01-09

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41171228);中科院战略性先导科技专项子课题(XDA05050504);中科院知识创新重要方向项目(KZCX2-YW-443)

[作者简介] 董莉茹(1987—),女,山西运城人,在读硕士,主要从事黄土高原深层土壤有机碳固存及土壤 C 库源汇效应研究。
E-mail:dlrdes@163.com

[通信作者] 许明祥(1972—),男,陕西吴起人,副研究员,博士,主要从事侵蚀环境土壤质量演变及调控、土壤-植被互动效应、流域生态系统健康评价研究。E-mail:xumx@nwsuaf.edu.cn

bon fluxes were compared and analyzed. 【Result】 1) Carbon fluxes simulated by the five diffusion models showed big differences. Moldrup model was the best whereas Penman model was the poorest. 2) Simulated carbon fluxes by the five diffusion models were all higher than the measured values with significant correlations ($P < 0.05$). 3) The optimal models for simulating soil carbon fluxes at layers of 0–20, 80–140, and 200 cm were Moldrup-2000, Moldrup-1997 and Millington-1961, respectively. 4) The soil CO₂ diffusion coefficients at soil depths of 0, 20, 80, 140 and 200 cm were 0.15, 0.14, 0.20, 0.22 and 0.27, respectively, and the estimated CO₂ fluxes were 0.72, 0.32, 0.30, 0.24 and 0.17 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, respectively. Soil carbon flux decreased as the increase of soil depth in the studied woodlands. 【Conclusion】 The best models for simulating soil carbon fluxes at different soil layers were different due to the differences in environmental factors in different soil depths of different *Robinia pseudoacacia* woodlands in the Hilly Loess Region. The research identified optimal soil carbon flux models and their parameters suitable for the Hilly Loess Region, which improved the assessment of regional soil carbon emission.

Key words: Hilly Loess Region; *Robinia pseudoacacia* woodland; soil carbon efflux models; diffusion coefficient

土壤碳通量是由不同深度土壤根系呼吸及微生物活动共同产生的。目前,已有许多学者对土壤表层碳通量的变化情况进行了研究,但是有关土壤垂直剖面碳通量的研究却极为缺少^[1-2]。此外,不同深度土壤碳通量对全球变暖效应也有不同的响应^[3]。因此,研究土壤垂直剖面碳通量有助于进一步明确土壤碳对气候变化的反馈作用^[4]。

通过对不同深度土壤碳通量的研究,可以很好地理解 CO₂ 气体在土壤中的产生和传输过程。通常使用 Fick 扩散法计算土壤碳通量,即通过测量一定深度内土壤 CO₂ 气体的变化及 CO₂ 气体在土壤内的扩散系数,并选取合适的通量模型来计算不同深度土壤的碳通量^[5]。采用扩散法计算碳通量对土壤破坏性较小,同时可以克服 Li-8100 动态腔室测量时低估土壤碳通量的缺陷,从而能够更为准确地计算不同深度的土壤碳通量^[6-8]。随着土层的加深,影响土壤呼吸的土壤温度、湿度、微生物、植物根系及土壤理化性质都发生了改变,导致不同深度土壤的扩散系数计算公式有所不同,因此,选择合适的扩散系数模型十分重要^[9]。

本研究使用气体井法和气相色谱仪测量黄土丘陵区刺槐林地土壤 CO₂ 浓度,结合 5 种广泛使用的气体扩散模型对不同深度的土壤碳通量进行估算,同时与 Li-8100 动态腔室测量结果进行比较,以确定黄土丘陵区不同深度土壤碳通量计算的最佳模型,为黄土丘陵区不同深度土壤碳通量的准确计算提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地设在陕西省安塞县纸坊沟,地理坐标为 N36°51'30", E109°19'30"。该区地形破碎,沟壑纵横,是典型的黄土高原丘陵区。年辐射量为 493 kJ/cm²,平均海拔 1 200 m,平均坡度 25°~35°,属于暖温带半干旱季风气候,年平均气温 8.8 °C;年均降水量为 549 mm(主要集中在 7—9 月份,占全年降水量的 61.1%),年蒸发量大于 1 463 mm;土层深厚,土壤以黄土母质上发育而成的黄绵土为主。由于水土流失严重,自 20 世纪 70 年代以来,该区逐步实施了大规模的生态恢复重建工程,并逐渐形成以“乔、草、灌”等为主要植被类型的土地利用方式^[10-12],对土壤碳通量产生了重要影响。该区常见的植被类型有以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)为主的人工林,以柠条(*Caragana korshinskii*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等为主的人工灌丛以及天然灌丛,此外还有撂荒草地。

1.2 样地选取

选取黄土丘陵区典型的刺槐林作为研究对象。2012 年 9 月中旬,在陕北安塞县纸坊沟选取土壤类型相同(黄绵土)、立地条件相近的 10, 20, 30 和 40 年生刺槐林为研究对象,选取坡耕地作为对照,探讨土壤环境差异对土壤碳通量的影响,不同样地的植被和地形特征见表 1。同时,对样地土壤剖面各土层土壤的温度、湿度和体积质量进行测定,结果如表 2 所示。

表 1 黄土丘陵区不同刺槐林样地的概况

Table 1 Characteristics of different *Robinia pseudoacacia* woodlands in the Hilly Loess Region

样地 Sample site	林龄/年 Woodage	海拔/m Altitude	坡位 Slope position	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	林下主要草本植被类型 Vegetation types of herb
坡耕地 Crop land	—	1 307	梁坡中部 Central of the slope	15~20	东 East	谷子 Millet
刺槐林地 <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	10	1 201	梁坡中部 Central of the slope	21~24	西 West	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i> 胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> 长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
	20	1 103	梁坡中部 Central of the slope	19~23	北偏东 North east	芨芨蒿 <i>Artemisia giraldii</i> 猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> 胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>
	30	1 285	梁坡中部 Central of the slope	23~25	北偏东 North east	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 长芒草 <i>Stipa bungeana</i> 芨芨蒿 <i>Artemisia giraldii</i>
	40	1 358	梁坡中部 Central of the slope	22~24	东偏南 East south	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 芨芨蒿 <i>Artemisia giraldii</i> 猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>

表 2 黄土丘陵区不同刺槐林样地各土层土壤的温度、含水量和体积质量

Table 2 Temperature, moisture and bulk density of each soil layer in different

Robinia pseudoacacia woodlands in the Hilly Loess Region

样地 Sample site	土层深度/cm Depth of soil layer	温度/°C Temperature	含水量/% Moisture	体积质量/(g·cm ⁻³) Bulk density
坡耕地 Crop land	0	23.8	0.018	1.13
	20	19.4	0.145	1.22
	80	14.7	0.145	1.25
	140	12.6	0.161	1.31
	200	11.0	0.168	1.33
10 年生刺槐林地 10 years old <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	0	18.8	0.126	1.09
	20	18.8	0.126	1.11
	80	13.3	0.155	1.24
	140	10.7	0.137	1.32
	200	9.8	0.107	1.34
20 年生刺槐林地 20 years old <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	0	23.2	0.106	1.12
	20	10.9	0.087	1.15
	80	15.3	0.073	1.19
	140	12.4	0.075	1.33
	200	18.6	0.103	1.35
30 年生刺槐林地 30 years old <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	0	18.4	0.064	1.13
	20	17.0	0.097	1.21
	80	16.7	0.061	1.24
	140	14.4	0.09	1.35
	200	13.0	0.074	1.33
40 年生刺槐林地 40 years old <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	0	22.1	0.073	1.14
	20	19.1	0.109	1.15
	80	14.4	0.059	1.25
	140	11.6	0.070	1.32
	200	10.4	0.061	1.34

1.3 方法

1.3.1 土壤 CO₂ 浓度的测定 本试验采用比较经典的气体井法测量不同土层土壤 CO₂ 浓度^[13-14]。分别在 5 个样地内各选 3 点作为重复,用土钻打孔,每点分别在距地面 200,140,80,20 cm 和地表处依次相互错位埋设气体采集器。埋设气体采集器时,将内径为 4 mm 的硬质塑料管的一端插入塑料漏斗

颈部,连接处用硅胶密封,另一端引至地面以上,插入橡胶软管并用橡皮小塞密封^[15]。同时,在土壤剖面的 200,140,80,20 cm 处和地表,分别布设土壤温度水分测定探头(Em 50,美国 Decagon 公司),探头垂直土壤剖面插入不同深度土层,并按原土层回填钻孔。待回填土壤与周围土壤环境趋于一致后开始取样。在每个采集器中抽取 5 mL 气体,用气相色谱

谱仪测定其中的 CO₂ 浓度^[16]。另外,在 30 年生刺槐林样地从 10:00—18:00 每小时采集 1 次气体样品。

1.3.2 土壤碳通量的计算 使用 Fick 扩散法计算不同深度土壤碳通量($F_s, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$):

$$F_s = -D_s \Delta C / \Delta z. \quad (1)$$

式中: D_s 表示土壤中 CO₂ 的扩散系数(m^2/s), C 表示 CO₂ 浓度($\mu\text{mol}/\text{m}^3$), z 表示土层深度(m)。

$$D_s = \epsilon Da. \quad (2)$$

式中: Da 表示在自由大气中 CO₂ 的扩散系数, $Da = 1.47 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; ϵ 表示 CO₂ 在土壤中的相对扩散系数。

常用的计算 ϵ 的经验模型有以下 5 种^[18-22]:

Penman 模型: $\epsilon = 0.66(\varphi - \theta)$. (3)

Marshall 模型: $\epsilon = (\varphi - \theta)^{1.5}$. (4)

Millington 模型: $\epsilon = (\varphi - \theta)^{10/3} \varphi^{-2}$. (5)

Moldrup-1997 模型: $\epsilon = 0.66(\varphi - \theta) \times (\varphi - \theta)^{(12-m)/3} \varphi^{(m-12)/3}$. (6)

Moldrup-2000 模型: $\epsilon = (\varphi - \theta)^{2.5} \varphi^{-1}$. (7)

式中: θ 为土壤体积含水量(cm^3/cm^3); φ 为土壤孔隙度, $\varphi = \rho_b / \rho_m$, 其中 ρ_b 为土壤体积质量(g/cm^3), ρ_m 为土壤比重, 矿质土壤 $\rho_m = 2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$; m 为常数, 本研究中 $m = 3$ 。

1.3.3 表层土壤碳通量的测量 抽取气体样品的同时,使用 Li-8100 开路式土壤碳通量测量系统测量表层土壤碳通量,以便于检验用扩散法计算土壤

碳通量的准确程度。为防止土壤环境变动对试验造成影响,于测量前 1 d 在 5 块样地的 3 个重复样点上分别布设内径 20 cm、高 10 cm 的 PVC 环,将 PVC 环一端削尖并插入土层深度 3~5 cm 处。表层土壤碳通量于 9:00—10:00 进行测定,每 2 s 测定 1 次,每 10 s 记录 1 次平均值。此外在 30 年生刺槐林样地,从 10:00—18:00 每小时测量 1 次表层土壤碳通量。

1.4 数据统计与分析

用气相色谱仪测定不同深度土层土壤 CO₂ 浓度,并根据 Fick 扩散法计算土壤碳通量。用 Li-8100 开路式土壤碳通量测量系统测量表层土壤碳通量,并进行线性回归分析,采用 SPSS 13.0 软件对数据进行统计与分析。

2 结果与分析

2.1 扩散公式中适用于不同刺槐林样地各土层 ϵ 值的获取

2.1.1 不同样地表层土壤的碳通量 用 Li-8100 开路式土壤碳通量测量系统对表层土壤碳通量进行测定,结果见表 3 和表 4。由表 3 可知,坡耕地以及 10,20,30,40 年生刺槐林地的表层土壤碳通量平均值分别为 0.36,0.58,0.65,0.86,0.84 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。表明表层土壤碳通量随植被恢复年限的增加总体呈增大趋势。由表 4 可知,30 年生刺槐林地在 11:00—13:00 时段表层土壤碳通量值大。

表 3 黄土丘陵区不同刺槐林样地的表层土壤碳通量(09:00—10:00)

Table 3 Carbon fluxes of surface soil in different *Robinia pseudoacacia* woodlands in the Hilly Loess Region (09:00—10:00)

样地 Sample site	林龄/年 Wood age	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average
坡耕地 Crop land	—	0.38	0.32	0.36
刺槐林地 <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	10	0.62	0.54	0.58
	20	0.63	0.69	0.65
	30	0.92	0.81	0.86
	40	0.81	0.87	0.84

表 4 黄土丘陵区 30 年生刺槐林样地 10:00—18:00 表层土壤碳通量(2013-05-17)

Table 4 Carbon fluxes of surface soil during 10:00—18:00 in 30 years old *Robinia pseudoacacia* woodland in the Hilly Loess Region (2013-05-17)

时间 Time	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	时间 Time	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average
10:00—11:00	0.92	0.81	0.86	14:00—15:00	0.69	0.61	0.66
11:00—12:00	1.19	1.12	1.15	15:00—16:00	0.81	0.76	0.78
12:00—13:00	1.27	1.17	1.22	16:00—17:00	0.69	0.74	0.71
13:00—14:00	0.89	0.81	0.85	17:00—18:00	0.72	0.58	0.66

2.1.2 基于 5 种扩散系数模型计算的不同样地各土层土壤碳通量 先使用气相色谱仪测定不同深度土层土壤 CO₂ 浓度,并利用 Fick 扩散法计算土壤碳

通量。本研究选取 5 种常用的气体扩散系数计算模型计算了各土层碳通量,结果见表 5 和表 6。由表 5 可知,采用扩散法计算的不同林龄刺槐林地土壤碳

通量与 Li-8100 腔室法实测值存在一定差异;在 5 种 CO₂ 扩散系数模型中, Penman 模型计算结果的平均值最高, Moldrup-2000 模型计算结果与实测值

最接近。由表 6 可知, 30 年生刺槐林地 10:00—18:00 土壤碳通量各模型计算值均大于实测值; Moldrup-2000 模型计算值与实测值差异最小。

表 5 黄土丘陵区不同刺槐林地各土层土壤碳通量实测值与计算值的比较

Table 5 Comparison of measured and calculated carbon fluxes of different soil layers in different *Robinia pseudoacacia* woodlands in the Hilly Loess Region $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

样地 Sample site	林龄/年 Wood age	土层深度/cm Depth of soil layer	土壤碳通量 实测值 Measured soil carbon flux	土壤碳通量计算值 Calculated of soil carbon efflux				
				Penman 模型 Penman model	Marshall 模型 Marshall model	Millington 模型 Millington model	Moldrup- 1997 模型 Moldrup-1997model	Moldrup- 2000 模型 Moldrup-2000model
坡耕地 Crop land	—	0	0.36	0.69	0.75	0.80	0.62	0.33
		20	0.36	0.52	0.49	0.32	0.20	0.16
		80	0.36	0.56	0.53	0.34	0.22	0.17
		140	0.36	0.57	0.51	0.29	0.18	0.16
		200	0.36	0.45	0.39	0.21	0.13	0.12
刺槐林地 <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	10	0	0.58	0.71	0.73	0.52	0.34	0.57
		20	0.58	0.83	0.84	0.60	0.40	0.30
		80	0.58	0.58	0.54	0.33	0.20	0.17
		140	0.58	0.66	0.61	0.39	0.26	0.20
		200	0.58	0.64	0.60	0.15	0.31	0.22
	20	0	0.65	0.65	0.66	0.51	0.35	0.64
		20	0.65	0.87	0.90	0.75	0.52	0.35
		80	0.65	0.94	0.99	0.86	0.31	0.39
		140	0.65	0.88	0.87	0.75	0.24	0.34
		200	0.65	0.72	0.68	0.21	0.36	0.25
	30	0	0.86	0.79	0.84	0.75	0.55	0.82
		20	0.86	0.74	0.76	0.6	0.41	0.35
		80	0.86	0.82	0.85	0.78	0.32	0.34
		140	0.86	0.71	0.68	0.54	0.29	0.25
		200	0.86	0.74	0.73	0.19	0.46	0.28
40	0	0.84	0.91	0.87	0.75	0.54	0.86	
	20	0.84	0.80	0.80	0.61	0.41	0.29	
	80	0.84	1.02	1.06	0.97	0.37	0.43	
	140	0.84	0.87	0.86	0.75	0.25	0.34	
	200	0.84	0.98	0.98	0.13	0.66	0.39	

表 6 黄土丘陵区 30 年生刺槐林地各土层 10:00—18:00 土壤碳通量实测值与计算值的比较

Table 6 Comparison of measured and calculated carbon fluxes of different soil layers during 10:00—18:00 in 30 years old *Robinia pseudoacacia* woodland in the Hilly Loess Region $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

土层深度/cm Depth of soil layer	时间 Time	土壤碳通量 实测值 Measured soil carbon flux	土壤碳通量计算值 Calculated of soil carbon efflux				
			Penman 模型 Penman model	Marshall 模型 Marshall model	Millington 模型 Millington model	Moldrup- 1997 模型 Moldrup-1997model	Moldrup- 2000 模型 Moldrup-2000model
0	10:00—11:00	0.86	0.79	0.84	0.75	0.55	0.82
	11:00—12:00	1.15	1.25	1.32	1.19	0.86	1.16
	12:00—13:00	1.22	1.46	1.54	0.82	1.00	1.32
	13:00—14:00	0.85	0.88	0.93	0.83	0.55	0.82
	14:00—15:00	0.66	0.80	0.84	0.71	0.42	0.68
	15:00—16:00	0.78	0.74	0.78	0.70	0.50	0.68
	16:00—17:00	0.71	0.77	0.81	0.73	0.53	0.72
17:00—18:00	0.66	0.74	0.79	0.71	0.51	0.69	
20	10:00—11:00	0.86	0.74	0.76	0.60	0.41	0.35
	11:00—12:00	1.15	0.85	0.81	0.65	0.49	0.42
	12:00—13:00	1.22	0.83	0.84	0.67	0.56	0.48
	13:00—14:00	0.85	0.77	0.83	0.62	0.43	0.37
	14:00—15:00	0.66	0.86	0.87	0.69	0.48	0.41

续表 6 Continued table 6

土层深度/cm Depth of soil layer	时间 Time	土壤碳通量 实测值 Measured soil carbon flux	土壤碳通量计算值 Calculated of soil carbon efflux				
			Penman 模型 Penman model	Marshall 模型 Marshall model	Millington 模型 Millington model	Moldrup-1997 模型 Moldrup-1997 model	Moldrup-2000 模型 Moldrup-2000 model
20	15:00-16:00	0.78	0.74	0.75	0.51	0.52	0.28
	16:00-17:00	0.71	0.79	0.69	0.61	0.42	0.35
	17:00-18:00	0.66	0.71	0.72	0.57	0.45	0.31
80	10:00-11:00	0.86	0.82	0.85	0.78	0.32	0.34
	11:00-12:00	1.15	0.81	0.92	0.77	0.49	0.41
	12:00-13:00	1.22	0.89	0.93	0.85	0.52	0.37
	13:00-14:00	0.85	0.82	0.91	0.78	0.59	0.34
	14:00-15:00	0.66	0.84	0.87	0.79	0.58	0.35
	15:00-16:00	0.78	0.81	0.84	0.76	0.56	0.26
	16:00-17:00	0.71	0.79	0.83	0.80	0.52	0.29
	17:00-18:00	0.66	0.76	0.79	0.64	0.53	0.32
140	10:00-11:00	0.86	0.71	0.68	0.54	0.29	0.25
	11:00-12:00	1.15	0.75	0.63	0.59	0.42	0.31
	12:00-13:00	1.22	0.78	0.75	0.60	0.47	0.28
	13:00-14:00	0.85	0.73	0.70	0.56	0.36	0.26
	14:00-15:00	0.66	0.71	0.68	0.54	0.31	0.25
	15:00-16:00	0.78	0.66	0.62	0.55	0.35	0.25
	16:00-17:00	0.71	0.75	0.72	0.53	0.33	0.22
	17:00-18:00	0.66	0.67	0.65	0.58	0.37	0.24
200	10:00-11:00	0.86	0.74	0.73	0.19	0.46	0.28
	11:00-12:00	1.15	0.79	0.78	0.12	0.49	0.30
	12:00-13:00	1.22	0.76	0.82	0.24	0.53	0.39
	13:00-14:00	0.85	0.81	0.80	0.13	0.50	0.31
	14:00-15:00	0.66	0.88	0.87	0.09	0.54	0.34
	15:00-16:00	0.78	0.85	0.83	0.12	0.44	0.35
	16:00-17:00	0.71	0.83	0.82	0.10	0.51	0.32
	17:00-18:00	0.66	0.77	0.76	0.65	0.47	0.29

2.1.3 研究区各土层土壤碳通量计算值与实测值的回归分析 用 5 种扩散模型计算坡耕地以及 10, 20, 30, 40 年生刺槐林样地各土层的土壤碳通量平均值,对各土层碳通量平均值(y)与实测值(x)进行线性回归分析,结果见表 7。表 7 显示,用扩散法计

算的土壤碳通量与其实测值均呈显著正相关关系 ($P < 0.05$); 在 0, 20, 80, 140, 200 cm 土层,土壤碳通量计算值与实测值决定性系数(R^2)最大的模型分别为 Moldrup-2000、Moldrup-2000、Moldrup-1997、Moldrup-1997 和 Millington。

表 7 黄土丘陵区各土层土壤碳通量计算值(y)与实测值(x)的回归分析

Table 7 Regression analysis between caculated (y) and measured (x) of carbon efflux of different soil layers in the hilly Loess region

土层深度/cm Depth of soil layers	模型 Model	回归方程 Regression equation	R^2
0	Penman	$y=0.3494x+0.5201$	0.48
	Marshall	$y=0.2505x+0.6052$	0.36
	Millington	$y=0.0294x+0.6467$	0.01
	Moldrup-1997	$y=0.0278x+0.0493$	0.02
	Moldrup-2000	$y=1.0365x-0.0381$	0.99
20	Penman	$y=0.4089x+0.4853$	0.37
	Marshall	$y=0.467x+0.4526$	0.36
	Millington	$y=0.5x+0.2459$	0.42
	Moldrup-1997	$y=0.3375x+0.1423$	0.43
	Moldrup-2000	$y=0.2904x+0.0991$	0.61
80	Penman	$y=0.7766x+0.274$	0.58
	Marshall	$y=0.9358x+0.1775$	0.60
	Millington	$y=1.1925x-0.1293$	0.65

续表 7 Continued table 7

土层深度/cm Depth of soil layers	模型 Model	回归方程 Regression equation	R^2
80	Moldrup-1997	$y=0.9495x-0.1605$	0.67
	Moldrup-2000	$y=0.4663x-0.0052$	0.63
140	Penman	$y=0.42x+0.4625$	0.41
	Marshall	$y=0.5195x+0.364$	0.45
	Millington	$y=0.7296x+0.0661$	0.52
	Moldrup-1997	$y=0.5915x-0.0062$	0.53
	Moldrup-2000	$y=0.2773x+0.0744$	0.50
200	Penman	$y=0.825x+0.1635$	0.78
	Marshall	$y=0.9312x+0.0641$	0.81
	Millington	$y=1.1023x-0.1866$	0.84
	Moldrup-1997	$y=0.8701x-0.19$	0.83
	Moldrup-2000	$y=0.4407x-0.04$	0.82

2.1.4 适用于不同刺槐林样地各土层的 ϵ 值 通过以上分析可知,在各刺槐林样地 0,20,80,140 和 200 cm 土层,依次采用 Moldrup-2000、Moldrup-2000、Moldrup-1997、Moldrup-1997 和 Millington 扩散系数模型计算的土壤碳通量与其实测值相关性最好,表明上述模型为不同刺槐林样地各土层最适合的扩散系数模型。用上述模型,结合已知的土壤温度、水分、孔隙度、体积质量,计算得出适用于黄绵土 0,20,80,140 和 200 cm 土层土壤的 ϵ 值分别为

0.15,0.14,0.20,0.22 和 0.27。

2.2 基于扩散法计算的不同刺槐林样地各土层的碳通量

选取合适的扩散系数模型,计算不同刺槐林样地各土层碳通量值,结果如表 8 所示。从表 8 可以看出,刺槐林地 0,20,80,140,200 cm 土层土壤碳通量的平均值分别为 0.72,0.32,0.30,0.24,0.17 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;在同一刺槐林地,随着土层深度的增加,土壤碳通量呈逐渐降低趋势。

表 8 基于最优扩散系数模型计算的黄土丘陵区不同刺槐林样地各土层的土壤碳通量

Table 8 Carbon flux of each soil layer in different *Robinia pseudoacacia* woodlands in the Hilly Loess Region based on the model with optimal diffusion coefficient $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

样地 Sample site	林龄/年 Wood age	土层深度/cm Depth of soil layer				
		0	20	80	140	200
坡耕地 Crop land	—	0.33	0.16	0.22	0.18	0.21
	10	0.57	0.30	0.20	0.26	0.15
刺槐林地 <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	20	0.64	0.35	0.31	0.24	0.21
	30	0.86	0.35	0.37	0.29	0.13
	40	0.82	0.29	0.32	0.25	0.19

3 讨论

在黄土丘陵区,利用扩散法对不同深度土壤碳通量进行计算时,必须进行适当的校正才能得到较为真实合理的结果。利用扩散模型计算不同深度土壤碳通量时,关键在于准确测量不同深度土壤 CO_2 浓度并选取合适的扩散系数模型^[9,17]。已有大量学者通过野外试验和室内模拟的方法总结出一些扩散系数经验模型^[18-22],并使用这些模型对不同深度土层土壤碳通量进行了计算。在计算土壤碳通量时, Penman 和 Marshall 模型是仅以土壤孔隙度作为参数的单参数模型,具有一定的狭隘性;而后来广泛使用的 Millington 模型也存在一定缺陷;近年来使用的 Moldrup 模型对前几种模型进行了整合,是更为精确的扩散系数模型。Pingintha 等^[23]使用与本研

究相同的 5 种扩散模型计算土壤碳通量,结果显示,扩散法计算结果大于实测值;线性回归分析显示,5 种扩散模型计算的土壤碳通量与实测值均存在显著相关性,其中 Moldrup 模型计算结果与实测值的相关性最显著($P < 0.05$)。本研究结果与之类似,用 Li-8100 腔室法得到的土壤碳通量实测值小于扩散法计算结果, Penman、Marshall、Millington、Moldrup-1997 和 Moldrup-2000 模型的计算结果与实测值之间均存在显著正相关性,其中 Moldrup-2000 模型计算结果最接近实测值,表明 Moldrup-2000 模型在对之前几个模型整合后,能够更准确地模拟土壤 CO_2 的扩散过程^[24]。

本研究还发现,在黄土丘陵区,土壤表层和 20 cm 土层 Moldrup-2000 模型计算的土壤碳通量与实测值相关性最高, R^2 分别为 0.99 和 0.61;80 和 140

cm 土层中, Moldrup-1997 模型计算的土壤碳通量与实测值的相关性最大, R^2 分别为 0.67 和 0.53; 在 200 cm 土层中, 用 Millington 模型计算的土壤碳通量值与实测值相关性较高, R^2 为 0.84。总体而言, 表层土壤碳通量计算值与实测值的相关性比其他土层大, 这可能是由于表层土壤碳通量实测值较其他土层准确。已有研究发现, 在中国北方杉木林 10, 20, 40, 60, 80 cm 土层, 土壤气体扩散系数依次为 0.14, 0.16, 0.15, 0.18, 0.36。本试验通过比较分析, 得出适用于黄绵土 0, 20, 80, 140, 200 cm 土层的土壤气体扩散系数分别为 0.15, 0.14, 0.20, 0.22, 0.27。

本试验利用 Moldrup-2000、Moldrup-2000、Moldrup-1997、Moldrup-1997 和 Millington 模型分别对 0, 20, 80, 140 和 200 cm 土层土壤碳通量进行计算, 所得土壤碳通量值分别为 0.72, 0.32, 0.30, 0.24 和 0.17 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 与前人研究结果^[24]类似, 表明所选取的扩散模型合适, 计算结果具有较高的可靠性。

土壤碳通量是土壤有机碳分解、根系分解和微生物活动共同作用的结果, 同时受环境因素、土壤温度和水分的影响, 其中土壤有机碳、植物根系是碳通量的主要来源。本课题组前期研究发现, 0~20, 20~80, 80~140, 140~200 cm 土层土壤有机碳含量依次为 6.5, 2.81, 2.22, 2.08 g/kg, 土壤根系生物量依次为 4.3, 7.54, 0.30, 0.19 g, 随着土层深度的增加, 20 cm 土层深度以下根系生物量减少, 土壤有机碳含量降低, 这将导致土壤碳通量减少; 同时, 各土层有机碳含量和根系生物量与扩散模型计算的土壤碳通量均存在良好的相关性 ($P < 0.05$), 为碳通量计算结果的可靠性提供了支持^[25]。

与 Li-8100 腔室法相比, 扩散法测定土壤碳通量时, 对土壤破坏小, 且计算结果更为准确; Li-8100 腔室法会造成土壤表面压力增加、 CO_2 浓度增大等情况, 从而影响测定结果。因此, 用扩散法估算土壤碳通量时, 可同时用 Li-8100 腔室法的测定结果进行对比, 这样有助于得到更真实的数据。本试验中, 5 种扩散系数模型计算所得土壤碳通量值都与 Li-8100 腔室法得到的测定值显著相关 ($P < 0.05$), 并且不同土层土壤对应的最佳扩散系数适用模型有所不同。

土壤碳循环是全球碳素平衡中的重要过程, 对黄土丘陵区刺槐林地深层土壤碳通量的研究可为科学评估退耕还林还草的土壤固碳效益提供依据, 对

于揭示深层土壤碳的稳定性、土壤碳库动态变化机理及深层土壤碳在生态系统碳循环中的作用, 丰富并深化固碳土壤学研究有重要科学意义。

4 结 论

1) 对土壤剖面碳通量数据进行校正是必要的, 但不同校正方法所起的作用有所差异。其中 Penman 模型计算的土壤碳通量值与实测值差异最大, 模拟效果较差, 而 Moldrup 模型模拟效果最好。

2) 5 种扩散模型计算的土壤碳通量均大于 Li-8100 腔室法得到的实测结果, 但与 Li-8100 测量结果均具有显著相关性。

3) 不同深度土层的环境因子有差异, 所以估算不同深度土层土壤碳通量的最佳模型也不同。黄土丘陵区刺槐林地 0~20, 80~140, 200 cm 土层土壤碳通量的最佳扩散模型分别为 Moldrup-2000、Moldrup-1997 和 Millington。

4) 在黄绵土 0, 20, 80, 140, 200 cm 土层, 土壤气体扩散系数分别为 0.15, 0.14, 0.20, 0.22 和 0.27, 据此计算的各土层土壤碳通量分别为 0.72, 0.32, 0.30, 0.24, 0.17 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 表明随着土层深度的增加, 土壤碳通量逐渐降低。本研究确定了黄土区气体扩散系数模型中的各种参数和不同土层碳通量的估算模型。

[参考文献]

- [1] Risk D, Kellman L, Beltrami H. In-situ incubations highlight the environmental constraints on soil organic carbon decomposition [J]. Environmental Research Letters, 2008, 3: 1-5.
- [2] Pumpanen J, Ilvesniemi H, Kulmala L, et al. Respiration in boreal forest soil as determined from carbon dioxide concentration profile [J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(5): 1187-1196.
- [3] Fang C, Monerrieff J B. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature [J]. Soil Biology Biochemistry, 2001, 33: 155-165.
- [4] 王超, 杨智杰, 陈光水, 等. 土壤垂直剖面 CO_2 通量研究 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(4): 1673-1705.
Wang C, Yang Z J, Chen G S, et al. Research on the flux of carbon dioxide in soil vertical profile [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2010, 5(4): 1673-1705. (in Chinese)
- [5] 杨智杰, 陈光水, 黄石德, 等. 中亚热带山区不同土地利用方式土壤呼吸的日动态变化 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, 2(4): 39-46.
Yang Z J, Chen G S, Huang S D, et al. Diurnal variation in soil respiration under different types of land use in a mid-subtropical mountainous area of southern China [J]. Journal of Sub-

- tropical Resources and Environment, 2009, 2(4): 39-46. (in Chinese)
- [6] Liang N, Hirano T, Zheng Z M, et al. Continuous measurement of soil CO₂ efflux in a larch forest by automated chamber and concentration gradient techniques [J]. Biogeosciences Discussions, 2010, 7(1): 1345-1375.
- [7] Baldocchi D, Tang J W, Xu L K. How switches and lags in biophysical regulators affect spatial-temporal variation of soil respiration in an oak-grass savanna [J]. Journal Geophysical Research, 2006, 111(G2): 479-492.
- [8] Myklebust M C, Hipps L E, Ryel R J. Comparison of eddy covariance, chamber, and gradient methods of measuring soil CO₂ efflux in an annual semi-arid grass [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(11): 1894-1907.
- [9] Davidson E A, Trumbore S E. Gas diffusivity and production of CO₂ in deep soils of the eastern Amazon [J]. Tellus B, 1995, 47(5): 550-565.
- [10] Chen L D, Gong J, Fu B J, et al. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the Loess Hilly Area, Loess Plateau of China [J]. Ecological Research, 2007, 22: 641-648.
- [11] 徐 勇, 田均良, 沈洪泉, 等. 生态重建磨蚀的评价方法: 以黄土丘陵区为例 [J]. 地理学报, 2004, 59(4): 621-628.
Xu Y, Tian J L, Shen H Q, et al. The evaluating method of eco-environment restoration patterns; A case study of loess hilly-gully region [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4): 621-628. (in Chinese)
- [12] Liu G B. Soil conservation and sustainable agriculture on the Loess Plateau: Challenges and prospects [J]. Ambio, 1999, 28: 663-668.
- [13] Davidson E A, Kathleen E, Susan E, et al. Vertical partitioning of CO₂ production within a temperate forest soil [J]. Global Change Biology, 2006, 12: 944-956.
- [14] Risk L K, Beltrami H. Carbon dioxide in soil profiles: Production and temperature dependence [J]. Geophysical Research letter, 2002, 11: 1-4.
- [15] 戴万宏, 王益全, 黄 耀, 等. 土壤剖面 CO₂ 浓度的动态变化及其受环境因素的影响 [J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 827-831.
Dai W H, Wang Y Q, Huang Y, et al. Seasonal dynamic of CO₂ concentration in loess soil and impact by environmental factors [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(5): 827-831. (in Chinese)
- [16] 方肇伦. 仪器分析在土壤学和生物学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 186-218.
F Z L. Instrument analysis in soil science and biology applications [M]. Beijing: Science Press, 1983: 186-218. (in Chinese)
- [17] Buckingham E. Contributions to our knowledge of the aeration of soils [M]. Washington DC, USA: USA Government Printing Office, 1904: 25.
- [18] Penman H L. Gas and vapour movements in the soil; I. The diffusion of vapours through porous solids [J]. The Journal of Agricultural Science, 1940, 30(3): 437-462.
- [19] Millington R J. Gas diffusion in porous media [J]. Science, 1959, 130(3367): 100-102.
- [20] Millington R J, Quirk J P. Permeability of porous solids [J]. Transactions of the Faraday Society, 1961, 57: 1200-1207.
- [21] Moldrup P, Olesen T, Rolston D E, et al. Modeling diffusion and reaction in soils: V. Predicting gas and ion diffusivity in undisturbed and sieved soils [J]. Soil Science, 1997, 162(9): 632-640.
- [22] Moldrup P, Olesen T, Gamst J, et al. Predicting the gas diffusion coefficient in repacked soil: Water-induced linear reduction model [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1588-1594.
- [23] Pingintha N, Leclerc M Y, Beasley J P J, et al. Assessment of the soil CO₂ gradient method for soil CO₂ efflux measurements: Comparison of six models in the calculation of the relative gas diffusion coefficient [J]. Tellus B, 2010, 62(1): 47-58.
- [24] 王 超, 黄群斌, 杨智杰, 等. 杉木人工林不同深度土壤 CO₂ 通量 [J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5711-5719.
Wang C, Huang Q B, Yang Z J, et al. Analysis of vertical profiles of soil CO₂ efflux in Chinese fir plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5711-5719. (in Chinese)
- [25] 马昕昕, 许明祥, 杨 凯. 黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探 [J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3894-3900.
Ma X X, Xu M X, Yang K. Soil organic carbon mineralization of Black Locust Forest in the deep soil layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China [J]. Environmental Science, 2012, 33(11): 3894-3900. (in Chinese)