

重构土体土壤呼吸及其水热影响因子日变化特征

张 剑¹, 雷 娜^{2,3}

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075;

3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 选取荒石滩地 4 种重构土体作为研究对象, 应用土壤碳通量测量系统(LI-8100), 对重构土体土壤呼吸和水热影响因子进行原位监测, 分析了重构土体土壤呼吸的日变化情况。结果表明, 4 种重构土体土壤呼吸在观测期间的日变化均呈现单峰曲线, 最低值出现在 6:00 或 20:00, 最高值出现在 10:00、12:00 或 14:00。4 种重构土体土壤呼吸值在 8 月份和 12 月份分别达到试验观测期间最大值和最小值, 其中, 添加蛭石、页岩、沙和砒砂岩重构土体的最大值分别为 9.88、10.47、14.94 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 12.19 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小值分别为 0.11、0.08、0.10 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。4 种重构土体日变化幅度的排序为添加沙>页岩>砒砂岩>蛭石。4 种重构土体土壤温度(指数模型)、土壤体积含水量(二次曲线模型)单因素以及土壤温度和含水量双因素(幂-指数模型)均能够解释土壤呼吸的日变化, 但是解释能力不同, 双因素模型解释能力一般高于 50.0%, 单因素模型中温度的解释能力显著高于水分; 3 种模型拟合下, 添加蛭石重构土体水热影响因子对土壤呼吸日变化的解释能力最低, 为 77%~97%, 指数模型和幂-指数模型下添加蛭石的重构土体土壤水热影响因子对土壤呼吸日变化的解释能力最低, 分别为 41%~96% 和 77%~97%, 二次曲线模型模拟下添加页岩重构土体土壤体积含水量对土壤呼吸日变化的解释能力最高, 为 28%~53%。

关键词: 土壤呼吸; 重构土体; 水热因子; 日变化

中图分类号: S152 文献标志码: A

Diurnal variation of respiration of reconstructed soil masses and its hydrothermal influence factors

ZHANG Jian¹, LEI Na^{2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;

2. Shaanxi Provincial Land and Engineering Construction Group Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710075, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Four kinds of reconstructed soil mass in the barren beach were selected as the research objects. The soil carbon flux measurement system (LI-8100) was used to monitor the soil respiration and hydrothermal factors of the reconstructed soil mass in situ, and the seasonal respiration changes of the reconstructed soil mass and its components were analyzed. The results showed that the daily changes of soil respiration for the four reconstructed soil masses showed a single-peak curve, and the patterns of daily changes for soil respiration were basically the same. The lowest value during the observation period appeared at 6:00 or 20:00, and the highest value appeared at 10:00, 12:00, or 14:00. The soil respiration values of the four reconstituted soil masses reached the maximum and minimum values during the experimental observation period in August and December, respectively, and the daily variation range of the four reconstituted soil masses during the observation period. Among them, the maximum values of reconstructed soil masses with meteorite, shale, sand, and soft rock were 9.88, 10.47, 14.94, and 12.19 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, the minimum values were 0.11, 0.08, 0.10, and 0.00 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The order was as sand>shale>soft rock>meteorite. The four factors of soil temperature (index model), soil volume water con-

收稿日期: 2019-06-19

修回日期: 2020-01-17

基金项目: 陕西省土地工程建设集团内部项目(DJNY2019-20)

作者简介: 张剑(1972-), 男, 陕西子洲人, 博士研究生, 研究方向为农业水土环境保护。E-mail: yazj6656@126.com

通信作者: 雷娜(1985-), 女, 陕西渭南人, 博士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 619648133@qq.com

tent (quadratic model), soil temperature, and water content (power-index model) can explain the daily variation of soil respiration. However, the explanatory power was different, the explanatory power of the two-factor model was generally higher than 50.0%, and the interpretation ability of temperature in the single factor model was significantly higher than that of water. Under the fitting of three kinds of models, the hydrothermal influence factor of the addition of meteorite to reconstruct the soil mass had the lowest ability to interpret the diurnal variation of soil respiration (77%~97%). Under the exponential model and the power-exponential model, the soil hydrothermal influence factor of the addition of meteorite to reconstruct the soil mass had the lowest ability to interpret the diurnal variation of soil respiration (41%~96% and 77%~97%). Under the quadratic curve model, the soil water content of adding the shale reconstituted soil mass had the highest ability to interpret the diurnal variation of soil respiration (28%~53%).

Keywords: soil respiration; reconstituted soil masses; hydrothermal factor; diurnal variation

在气候变暖日益加剧的大背景下,土壤呼吸通过参与生态系统碳循环影响气候变化,因此,国内外众多学者开展了针对不同类型生态系统、不同土地利用类型^[1-3]、不同地域、退化土壤等土壤呼吸特征的研究^[4-5]。学者们的研究一般都是从最小时间研究尺度——土壤呼吸日变化开始的。土壤呼吸日变化规律的研究可为进一步掌握土壤呼吸季节变化及其影响因子、准确核算区域碳排放情况提供数据支撑。众多学者研究结果均显示温度和水分是土壤呼吸日变化的重要环境因子^[6-7],有许多研究表明土壤呼吸速率与大气温度或土壤不同深度温度之间具有显著的相关关系,一般可用线性函数、指数函数等形式来描述^[8-9]。

我国耕地资源紧缺,目前主要通过土地整治工程进行补充,随着耕地后备资源的减少,土地整治已从简单的土地平整、配套设施修建发展到土体重构。在陕西省宝鸡市、华阴市等地存在大量的荒石滩地,已有工程通过添加不同成土材料和改良材料在荒石滩地进行土体重构,重构土体将成为今后土地整治的主要方向以及补充耕地资源的重要手段,与此同时土体重构改变了区域下垫面条件,导致新形成的土体土壤呼吸产生变化,进而对区域气候产生影响,但现阶段研究重构土体土壤呼吸还不多见。本研究以添加蛭石、页岩、沙和砒砂岩的4种重构土体为研究对象,每月份选取1个典型日,使用土壤碳通量测定系统对土壤呼吸进行观测,同时对土壤水分、温度等水热影响因子进行测定,以期探明4种重构土体土壤呼吸和水热影响因子日变化特征及其之间的关系,为重构土体土壤呼吸的研究提供科学参考,同时为准确评估区域CO₂排放及制定合理的CO₂减排措施提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验样地概况

试验样地位于陕西省宝鸡市眉县汤峪镇上王村(107°53'50"E,34°8'33"N)。该试验样地是荒石滩地整治工程的示范区域,总面积8.00 hm²,实现新增耕地6.80 hm²,新增产值11.20万元。选取砒砂岩、沙、泥质页岩、蛭石4种材料,将选取的4种材料粉碎过10 mm筛,消毒灭菌处理后,分别与构建土源混合(构建土体所使用的土源为当地常见土壤类型壤土),形成蛭石、页岩、沙和砒砂岩与土壤混合层(50 cm),进而形成砾石+蛭石+壤土型、砾石+页岩+壤土型、砾石+沙+壤土型和砾石+砒砂岩+壤土型4种重构土体(以下简称蛭石、页岩、沙、砒砂岩重构土体),容重分别为1.55,1.36,1.52 g·cm⁻³和1.38 g·cm⁻³,进行长期定位试验。其中蛭石、页岩、砒砂岩、沙用量均为1×10⁻³ m³·m⁻²,添加比例均为2%(体积比)。4个试验样地规格均为20 m×30 m。4个试验样地内均埋设3个内径为10 cm×20 cm的土壤呼吸环,保证呼吸环高出地面2 cm。

1.2 研究方法

2017年11月至2018年10月,每月选取1个典型日对4个试验样地全部土壤呼吸环进行测量,每个典型日的测量时间为6:00、8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00。土壤呼吸测定使用土壤碳通量测量系统(LI-8100),测定土壤碳通量、土壤5 m处温度和10 cm处含水量,每个土壤呼吸环重复测定3次,测量时长为4 min,降水量等主要通过试验小区3 m外安装的HOBO气象站自动获取。

1.3 数据分析方法

土壤呼吸与土壤温度之间的关系用指数模型

拟合,土壤呼吸与含水量之间的关系采用二次曲线模型拟合,土壤呼吸与土壤温度和土壤体积含水量之间的关系采用幂-指数模型拟合。

$$R_s = ae^{bT} \quad (1)$$

$$R_s = aw^2 + bw + c \quad (2)$$

$$R_s = ae^{bT}w^c \quad (3)$$

式中 R_s 为土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) T 为土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$) W 为土壤体积含水量 (%); a 、 b 、 c 分别为拟合参数。

2 结果与分析

2.1 重构土体土壤呼吸日变化

4 种重构土体土壤呼吸在观测月份的日变化均呈现出单峰曲线,观测月份的最低值出现在 6:00 或 20:00,最高值出现在 10:00、12:00 或 14:00。这主要是由 4 种重构材料蛭石、页岩、沙、砒砂岩的物质特性决定的。在观测的 12 个月中,添加蛭石、页岩、沙、砒砂岩的 4 种重构土体日变化幅度的范围分别为 0.37~3.42、0.52~4.34、0.71~4.62、0.55~4.03 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。观测 12 个月内 4 种重构土体日变化幅度的排序为添加沙>页岩>砒砂岩>蛭石,可见添加沙的重构土体土壤呼吸日变化幅度最大,页岩次之,砒砂岩较小,蛭石日变化幅度最小(图 1)。

1 月份,气温达到一年中的最低值,作物和微生物生理活动基本停止,4 种重构土体土壤呼吸值在观测时段内达到最低,日变化幅度也最小。添加蛭石、页岩、沙、砒砂岩的重构土体土壤呼吸最小值分别为 0.04、0.06、0.04 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,最大值均出现在 12:00,其日变化幅度分别为 0.37、0.59、0.71 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0.55 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1c)。

8 月份,属于作物的生长旺季,气温高且雨量充沛,4 种重构土体土壤呼吸值达到试验观测期间最大值,观测时段最大值均出现在 12:00,最小值出现在 6:00 和 20:00。添加蛭石、页岩、沙、砒砂岩的重构土体土壤呼吸值最高分别为 9.88、10.47、14.94 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 12.19 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,日变化幅度分别为 3.42、4.34、4.62 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 4.03 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1j)。

2.2 重构土体土壤呼吸与水热影响因子日变化的关系

2.2.1 土壤呼吸与土壤温度日变化关系 指数模型能够表征添加蛭石、页岩、沙、砒砂岩 4 种重构土体土壤呼吸与土壤 5 cm 处温度之间的日变化关系。

4 种重构土体土壤呼吸速率与土壤温度存在显著的正指数相关关系。观测时段内添加蛭石的重构土体土壤温度能够解释土壤呼吸日变化的 41.0%~96.0%,添加页岩的重构土体土壤温度能够解释土壤呼吸日变化的 53.0%~98.0%,添加沙的重构土体土壤温度能够解释土壤呼吸日变化的 76.0%~98.0%,添加砒砂岩的重构土体土壤温度能够解释土壤呼吸日变化的 66.0%~96.0%(表 1)。其中添加沙重构土体土壤温度对土壤呼吸日变化的解释能力最高,添加蛭石的重构土体土壤温度对土壤呼吸日变化的解释能力最低。

2.2.2 土壤呼吸与土壤体积含水量日变化关系

二次曲线模型能够解释 4 种重构土体土壤呼吸与土壤体积含水量之间日变化的关系,二者之间呈显著负相关,但是解释能力显著低于温度的解释能力。观测时段内添加蛭石的重构土体土壤体积含水量单因子能够解释土壤呼吸日变化的 23.0%~46.0%,添加页岩的重构土体土壤体积含水量单因子能够解释土壤呼吸日变化的 28.0%~53.0%,添加沙的重构土体土壤体积含水量单因子能够解释土壤呼吸日变化的 26.0%~44.0%,添加砒砂岩的重构土体土壤体积含水量单因子能够解释土壤呼吸日变化的 24.0%~50.0%(表 2)。添加页岩重构土体土壤体积含水量单因子对土壤呼吸日变化的解释能力最高,添加蛭石重构土体土壤体积含水量单因子对土壤呼吸日变化的解释能力最低。

2.2.3 土壤呼吸与土壤温度、体积含水量日变化关系 幂-指数模型能够表征 4 种重构土体土壤呼吸与土壤温度、体积含水量之间的日变化关系,土壤呼吸与水热因子之间呈显著正相关。

观测时段内添加蛭石的重构土体土壤温度和体积含水量双因子能够解释土壤呼吸日变化的 56.0%~94.0%,添加页岩的重构土体土壤温度和体积含水量双因子能够解释土壤呼吸日变化的 67.0%~53.0%,添加沙的重构土体土壤温度和体积含水量双因子能够解释土壤呼吸日变化的 83.0%~98.0%,添加砒砂岩的重构土体土壤温度和土壤体积含水量双因子能够解释土壤呼吸日变化的 56.0%~99.0%(表 3)。其中添加沙的重构土体土壤温度和土壤体积含水量双因子对土壤呼吸日变化的解释能力最高,添加蛭石的重构土体土壤温度和土壤体积含水量双因子对土壤呼吸日变化的解释能力最低。

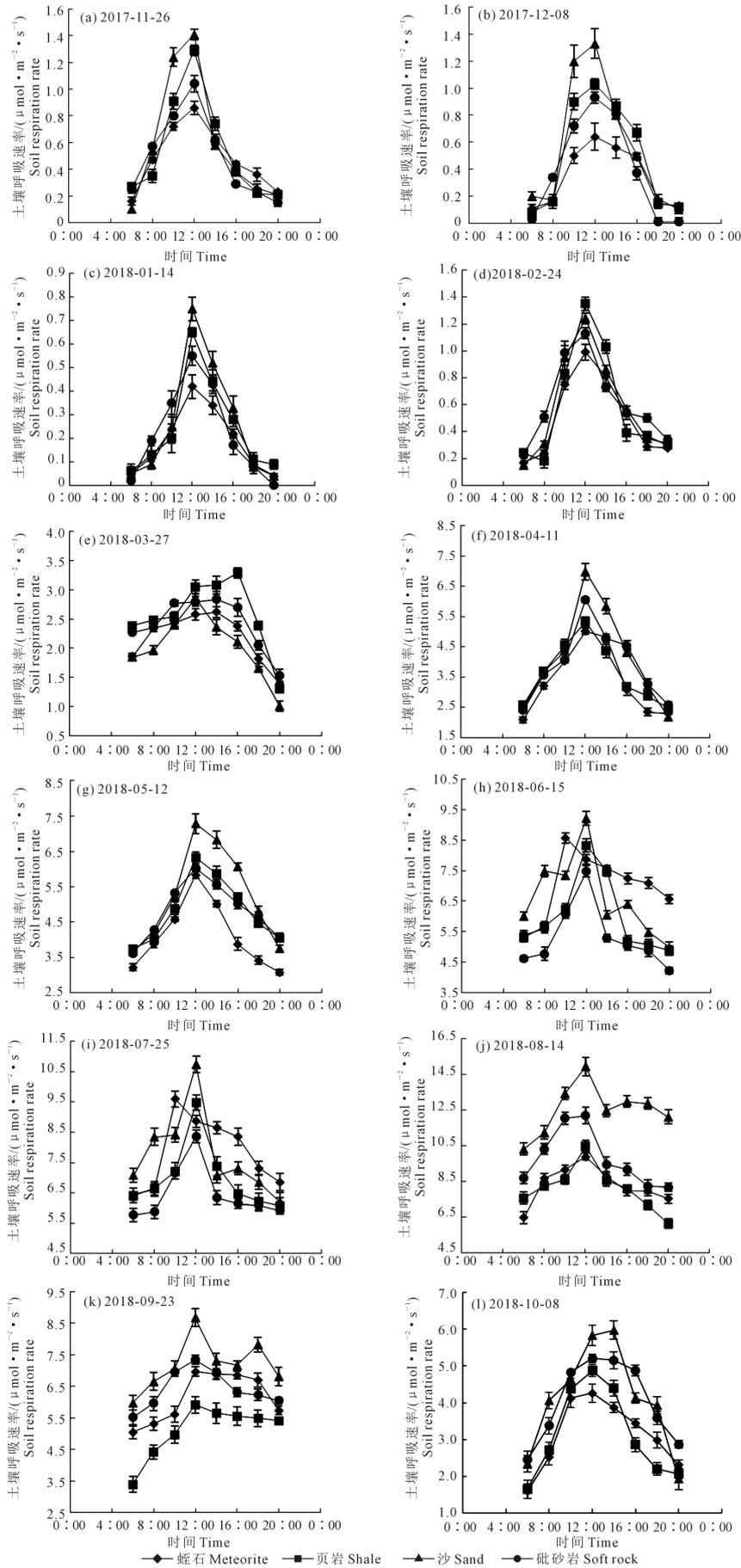


图 1 测定期内各月份不同重构土体土壤呼吸日变化

Fig.1 Diurnal variation of soil respiration in different reconstructed soils in each month

表 1 重构土体土壤呼吸速率(R_s)与土壤温度(T_s)日变化之间的关系($R_s = ae^{bT}$)

Table 1 Relationship between daily soil respiration rate and temperature for reconstituted soil mass

日期(月-日) Date (m-d)	蛭石 Meteorite			页岩 Shale			沙 Sand			砒砂岩 Soft rock		
	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
11-26	0.0053	0.5971	0.85	0.0022	0.7045	0.89	0.0018	0.7121	0.84	0.0041	1.7534	0.94
12-08	0.0113	0.6412	0.93	0.0009	1.158	0.98	0.0029	0.9266	0.93	0.0053	0.0005	0.80
01-14	0.1054	1.6142	0.41	0.1133	1.7351	0.76	0.0704	1.9597	0.86	0.0838	1.7163	0.66
02-24	0.0050	0.3788	0.92	0.0012	0.7946	0.84	0.0001	1.1005	0.86	0.0045	0.6217	0.84
03-27	0.3050	0.1296	0.49	0.2237	0.1597	0.53	0.1651	0.1638	0.87	0.2925	0.1376	0.90
04-11	0.5737	0.1057	0.80	0.5862	0.1133	0.96	0.4076	0.1413	0.98	0.6669	0.1091	0.87
05-12	0.4896	0.1032	0.81	0.2495	0.1345	0.91	0.1836	0.1485	0.94	0.5519	0.1010	0.93
06-15	0.8877	0.0836	0.61	0.6772	0.0868	0.95	0.4751	0.1009	0.83	0.6433	0.0843	0.74
07-25	1.0700	0.0732	0.63	0.7522	0.0776	0.51	0.6225	0.0807	0.76	0.6557	0.0745	0.67
08-14	1.4698	0.0674	0.60	1.3315	0.0723	0.59	1.3642	0.0802	0.97	1.5094	0.0713	0.96
09-23	1.0979	0.0913	0.82	0.7797	0.0982	0.59	0.7207	0.1174	0.79	1.3289	0.0845	0.60
10-08	0.6334	0.0903	0.96	0.5484	0.0959	0.87	0.3680	0.1257	0.85	0.8892	0.0839	0.81

表 2 重构土体呼吸速率(R_s)与土壤体积含水量(W_s)日变化之间的关系($R_s = aw^2 + bw + c$)

Table 2 Relationship between daily soil respiration rate and volumetric water content for reconstituted soil mass

日期(月-日) Date (m-d)	蛭石 Meteorite				页岩 Shale		沙 Sand		砒砂岩 Soft rock	
	a	b	c	R^2	a	R^2	a	R^2	a	R^2
11-26	-0.0074	0.0563	-0.0002	0.23	-0.2907	0.41	-0.5006	0.26	-0.4018	0.37
12-08	-0.3027	0.0857	-0.0138	0.27	-1.2562	0.53	-0.6835	0.32	-0.1040	0.26
01-14	-0.2926	0.321	-0.0447	0.27	-2.4507	0.49	-2.4507	0.49	-0.6520	0.47
02-24	-1.0419	0.2341	-0.0171	0.46	-1.3107	0.34	-0.4457	0.38	-0.6641	0.46
03-27	-4.5251	1.5778	-0.0874	0.46	-1.4536	0.36	-1.727	0.40	-3.2451	0.40
04-11	-7.2434	3.9182	-0.4361	0.43	-9.3423	0.37	-18.921	0.29	-11.501	0.38
05-12	-16.848	3.9518	-0.2945	0.46	-2.1421	0.40	-9.8838	0.44	-7.6091	0.44
06-15	-3.8989	1.0745	-0.0794	0.33	-5.1743	0.28	-4.0945	0.41	-6.4708	0.24
07-25	-8.4506	0.0718	-0.0391	0.37	-8.2741	0.42	-8.3395	0.29	-6.2462	0.40
08-14	-5.2308	0.6053	-0.0220	0.31	-8.5168	0.31	-13.644	0.29	-17.665	0.49
09-23	-5.1123	0.2868	-0.0130	0.38	-4.4172	0.53	-4.9809	0.37	-8.5975	0.45
10-08	-1.4618	0.7283	-0.0577	0.46	-5.5392	0.39	-0.8546	0.23	-3.4286	0.50

表 3 重构土体呼吸速率(R_s)与土壤温度(T_s)、体积含水量(W_s)日变化的关系($R_s = ae^{bT}w^c$)

Table 3 Relationship between daily soil respiration rate and temperature and volumetric water content for reconstituted soil mass

日期(月-日) Date (m-d)	蛭石 Meteorite				页岩 Shale		沙 Sand		砒砂岩 Soft rock	
	a	b	c	R^2	a	R^2	a	R^2	a	R^2
11-26	0.009	0.515	0.072	0.9	0.001	0.91	0.001	0.93	0.004	0.99
12-08	0.032	0.602	0.412	0.91	0.002	0.98	0.003	0.99	0.002	0.93
01-14	0.142	1.053	0.034	0.56	0.031	0.92	0.040	0.95	1.315	0.56
02-24	0.013	0.407	0.207	0.91	0.001	0.88	0.001	0.95	0.005	0.87
03-27	0.052	0.236	0.118	0.75	0.001	0.90	0.020	0.85	0.486	0.92
04-11	0.020	0.328	0.036	0.97	0.056	0.99	0.067	0.93	0.122	0.97
05-12	0.032	0.228	0.022	0.92	0.027	0.88	0.007	0.98	0.079	0.95
06-15	0.322	0.120	0.060	0.87	0.103	0.98	0.113	0.97	0.055	0.87
07-25	0.250	0.126	0.074	0.90	0.162	0.90	0.432	0.68	0.668	0.72
08-14	0.994	0.076	0.083	0.77	0.127	0.91	0.737	0.97	0.186	0.93
09-23	0.003	0.388	0.006	0.94	0.009	0.67	0.111	0.86	0.018	0.95
10-08	0.109	0.189	0.016	0.85	0.021	0.89	0.038	0.83	0.068	0.90

3 讨 论

3.1 不同重构材料对土壤呼吸的影响

国内外已研究了高达 60 种矿物材料应用于土壤质量提升,并形成系列改良产品如矿物肥料、生长剂、营养物质载体等^[10]。现阶段众多学者研究认为砒砂岩能够改良土壤性状,增加土壤的持水性和保水性,吸附土壤重金属污染,进而提高作物产量^[11]。学者们研究表明,土壤中适当掺沙可增加土壤的通透性、渗水性、保湿性,使土壤中空气含量增加^[12]。康倍铭等^[13]研究了添加一定比例的页岩对土壤水稳性团聚体、孔隙度、土壤有机质、有效含水量和水分蒸发等理化性质的影响,结果表明改良后的土壤孔隙度、有效含水量和水分蒸发变化不明显,但土壤有机质、水稳性团聚体显著提高。蛭石作为土壤改良剂被学者们广泛认可,研究表明蛭石能够改善土壤的理化性质及生物营养成分,并在物理性质方面促使土壤形成良好的结构,提高蓄水保墒能力。

不同重构材料的性质不同,会导致土壤呼吸表现出一定的差异性。砒砂岩、页岩黏粒含量高,是成土材料,蛭石作为改良材料,3 种材料均可增加土壤的保水性和持水性。水分占据了土壤的空隙,导致土壤中 CO₂ 含量相对较少,土壤呼吸不强烈,有利于环境保护。同时沙作为土壤改良材料,能够使土壤中空气含量增加从而增加土壤呼吸强度,不利于环境保护。

3.2 重构土体土壤呼吸与水热影响因子之间的关系

温度是影响土壤呼吸速率的重要因子。学者们认为指数模型能够解释土壤呼吸速率的绝大部分变异^[14-16],土壤温度可通过影响植物根系以及土壤中微生物的活动间接影响土壤呼吸。本研究发现 4 种重构土体呼吸日变化与土壤温度呈显著正相关,与大部分学者得到的结论一致^[17-19]。土壤体积含水量对土壤呼吸的影响比较复杂,学者们在不同地域、不同研究时段、不同生态系统等得出的结论往往差异较大^[20-21]。土壤体积含水量除能够通过影响根系的生长以及土壤中微生物的活动影响土壤呼吸速率外,还可以通过影响土壤中 CO₂ 的含量以及传输过程影响土壤呼吸速率。有研究指出土壤体积含水量与土壤之间的关系可用对数模型、二

次曲线和线性关系模拟,二者呈显著负相关^[22-23];也有研究指出,当土壤发生水分胁迫时,水分可成为影响土壤呼吸的主导因素^[24]。本研究发现二次曲线的模拟效果好于线性模型,但体积含水量与土壤呼吸的相关系数较小,即对土壤呼吸的影响较小。多数研究均表明土壤呼吸日变化一般受到土壤温度和土壤水分的共同影响,因而采用二者复合来表征土壤呼吸的日变化情况^[25-26]。有学者对中国温带森林土壤呼吸的 6 种生态系统进行研究,发现双因素模型的解释能力一般高于 50.0%,解释能力通常情况下高于单因素模型^[27]。本研究中得到幂-指数模型即土壤温度、体积含水量对土壤呼吸日变化的解释能力大于 56.0%,其和指数模型的解释能力远高于二次曲线模型,但大部分情况下,幂-指数模型的解释能力高于指数模型,这与前人得到的结论类似。

4 结 论

1) 4 种重构土体土壤呼吸在观测月份的日变化均呈现单峰曲线,呼吸日变化模式基本相同,观测月份的最低值出现在 6:00 和 20:00,最高值出现在 10:00、12:00 和 14:00。8 月份 4 种重构土体土壤呼吸值达到试验观测期间最大值,12 月份 4 种重构土体土壤呼吸值在观测时段内达到最低,日变化幅度也最小,观测 12 个月份内 4 种重构土体日变化幅度的排序为添加沙>页岩>砒砂岩>蛭石,添加蛭石的重构土体更有利于生态环境的保护。

2) 4 种重构土体土壤温度(指数模型)、土壤体积分含水量(二次曲线模型)单因素以及土壤温度和含水量双因素(幂-指数模型)均能够解释土壤呼吸的日变化,但是解释能力不同。双因素模型解释能力一般高于 50.0%,单因素模型中温度的解释能力显著高于水分,水分的解释能力不强,一般低于 50.0%,表征重构土体水热影响因子与呼吸之间的关系最优的是双因素模型。

参 考 文 献:

- [1] 解欢欢,马文瑛,赵传燕 等. 祁连山中部亚高山草地土壤呼吸及其组分研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 653-661.
- [2] 谢育利,陈云明,唐亚坤 等. 黄土丘陵区油松、沙棘人工林土壤呼吸动态及其对土壤温度和水分响应[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(1): 33-42.
- [3] 来亚男,严俊霞,李洪建. 不同土地利用方式下土壤呼吸的日变化特征[J]. 山西农业科学, 2018, 46(2): 251-255.

- [4] 任志胜, 齐瑞鹏, 王彤彤 等. 风化石对晋陕蒙矿区排土场新构土体土壤呼吸的影响[J]. 农业工程学报, 2015, (23): 230-237.
- [5] 王芳. 覆土厚度对矿区重构土壤呼吸特征的影响研究——以淮南潘集矿区为例[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- [6] 周育智, 王芳, 陈孝杨, 等. 生态修复模式对淮南矿区重构土壤CO₂通量日变化的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 40-46.
- [7] 谢慧慧, 樊军, 齐丽彬 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区典型植被下土壤呼吸季节变化特征与影响因素[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 2995-3003.
- [8] 张增信, 施政, 何容, 等. 北亚热带次生栎林和人工松林土壤呼吸日变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(1): 19-23.
- [9] 刘合满, 曹丽花, 马和平. 土壤呼吸日动态特征及其与大气温度、湿度的响应[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 193-196.
- [10] 于阳辉, 李永霞, 张俊红, 等. 非金属矿物在土壤改良中的应用现状与发展前景[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2005(1): 37-39.
- [11] 温婧. 砒砂岩修复重金属污染土壤的研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- [12] 简亚莉, 李跃进, 陈玉海, 等. 碱化盐土掺砂对土壤理化性状和玉米产量影响的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 119-123.
- [13] 康倍铭, 徐健, 吴淑芳 等. PAM 与天然土壤改良材料混合对部分土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 68-72.
- [14] 冯朝阳, 吕世海, 高吉喜, 等. 华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 20-26.
- [15] 颜学佳, 魏江生, 周梅, 等. 兴安落叶松林土壤呼吸及组分的变化特征[J]. 生态环境学报, 2013(6): 948-954.
- [16] 涂志华, 庞卓, 赵阳, 等. 北京西山侧柏人工林土壤呼吸组分及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2948-2956.
- [17] 王立刚, 邱建军, 李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究[J]. 中国土壤与肥料, 2002, (6): 13-17.
- [18] 刘爽, 严昌荣, 何文清, 等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 2919-2924.
- [19] 张晓龙, 沈冰, 权全, 等. 渭河平原农田冬小麦土壤呼吸及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2551-2560.
- [20] 余再鹏, 万晓华, 胡振宏, 等. 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2529-2538.
- [21] 马和平, 郭其强, 李江荣, 等. 色季拉山 4 种林型土壤呼吸及其影响因素[J]. 土壤学报, 2016(1): 253-260.
- [22] 段北星, 满秀玲, 宋浩, 等. 大兴安岭北部不同类型兴安落叶松林土壤呼吸及其组分特征[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(2): 40-50.
- [23] 王清玉, 张建军, 梁伟, 等. 晋西黄土区土壤呼吸日变化特征及其与环境因子的关系[J]. 广东农业科学, 2012, 39(10): 80-84.
- [24] 马泽清, 王义东, 王辉民, 等. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(5): 601-610.
- [25] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤呼吸组分的分离量化[J]. 生态学报, 2005, 26(6): 1640-1647.
- [26] 李化山, 汪金松, 刘星, 等. 模拟氮沉降对太岳山油松林土壤呼吸的影响及其持续效应[J]. 环境科学学报, 2014, 34(1): 238-249.
- [27] Wang C K, Yang J Y, Zhang Q Z. Soil respiration in six temperate forests in China [J]. Global Change Biology, 2006, 12(11): 2103-2114.

(上接第 231 页)

- [28] 田正书. 施氮量对高密度杂交油菜产量及倒伏相关性状的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.
- [29] 刘士山, 张余红, 刘前禄 等. 甘蓝型早熟油菜直播高产栽培的适宜施氮量和密度研究[J]. 作物研究, 2017, 31(5): 494-497.
- [30] 刘宝林, 邹小云, 宋来强 等. 氮肥用量对迟直播早熟油菜产量及氮素利用率的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(6): 852-861.
- [31] 马江萍. 不同施氮量对冬油菜产量的影响[J]. 宁夏农林科技, 2014, 55(4): 31-38.
- [32] 吴永成, 陈天才, 彭海浪 等. 施氮量和种植密度对迟直播油菜产量、品质及氮肥利用率的影响[J]. 西南农业学报, 2012, 25(4): 1320-1325.
- [33] 朱芸, 徐华丽, 张洋洋 等. 长江流域农民习惯施肥与推荐施肥的冬油菜产量与养分效率差异分析-基于大样本田间试验[J]. 中国农业科学, 2018, 51(15): 128-137.
- [34] 吴永成, 马霓, 黄晓明 等. 施氮量对中双 11 号油菜农艺性状、产量品质及氮肥利用率的影响[J]. 四川农业大学学报, 2014, 32(3): 260-264, 282.
- [35] Hocking P J, Stapper M. Effects of sowing time and nitrogen fertilizer on canola and wheat, and nitrogen fertilizer on Indian mustard. I. Dry-matter production, grain yield and yield components [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2001, 52: 626-634.
- [36] Hocking P J, Stapper M. Effects of sowing time and nitrogen fertilizer on canola and wheat, and nitrogen fertilizer on Indian mustard. II. Nitrogen concentrations, N accumulation, and N fertilizer use efficiency [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2001, 52: 635-644.