

黄土高原水蚀风蚀交错带水分和密度对人工草地土壤呼吸的影响

李学章¹, 邵明安³, 魏孝荣², 贾小旭¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 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. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 为研究黄土高原水蚀风蚀交错带不同水分与密度处理的人工苜蓿和沙打旺草地土壤呼吸特征, 分析了人工草地土壤呼吸对水分和密度的响应及其与环境因子的关系。结果表明: 水分增加能够显著促进黄土高原水蚀风蚀交错带人工草地土壤呼吸速率($P < 0.01$), 土壤呼吸对不同密度处理的响应特征因草地植被类型不同而异, 土壤呼吸速率的季节变化对水分增加和密度响应不敏感。土壤水分是土壤呼吸的限制因子, 土壤温度与土壤呼吸速率在 6-7 月份(旱季后期)相关性不明显, 8 月份后(雨季)相关性增强。土壤呼吸与表层土壤水分和温度有着显著的耦合关系, 加水减弱了苜蓿草地土壤呼吸对水分和温度的依赖, 而未改变沙打旺草地土壤呼吸对表层土壤水分和温度的依赖。

关键词: 水蚀风蚀交错带; 水分; 密度; 土壤呼吸; 水温耦合; 人工草地

中图分类号: S152.7; S154.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2011)04-0207-05

Effects of Water and Density on Soil Respiration in Vegetated Grassland in Wind-Water Erosion Crisscross Region

LI Xue-zhang¹, SHAO Ming-an³, WEI Xiao-rong², JIA Xiao-xu¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water

Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and

Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: In this paper, soil respiration rate of *Medicago sativa* L and *Astragalus adsurgens* Pall grassland in wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau were measured to understand the response of soil respiration in vegetated grassland to water and plant density and to relate soil respiration with environmental factors. The results showed that water adding significantly accelerated soil respiration rate ($P < 0.01$), while the response of soil respiration to plant density varied with plant species. The seasonal change of soil respiration was not affected by water and density treatments. Soil respiration was not significantly correlated with soil temperature in June and July (later dry seasons), but significantly correlated with soil temperature in August (rain season), suggesting that soil respiration in vegetated grassland was mainly limited by water. Soil respiration was significantly coupled with surface soil water and temperature, and thus depended on them. Adding water decreased the dependence of soil respiration on surface soil water and temperature in *Medicago sativa* L grassland rather than in *Astragalus adsurgens* Pall grassland.

Key words: wind-water erosion crisscross region; water; density; soil respiration; soil water and temperature coupling; vegetated grassland

土壤呼吸是陆地上仅次于光合作用的碳流通途径, 对陆地生态系统碳循环和全球气候变化有重要影响^[1]。草地建设是黄土高原生态环境建设的重要措施, 它不仅能为畜牧业的发展提供物质基础, 还具有水土保持、涵养水源等重要的生态功能, 在改善黄土高原退化的生态环境, 促进社会、经济、生态和谐发展方面具有重要作用^[2]。草地生态系统是我国最大的陆地生态系统^[3], 认识草地生态系统土壤呼吸及碳循环相关过程对于分析草地对全球气候变化的响应, 准确评价和预测中国陆地生态系统碳平衡和变化趋势有重要的理论意义^[4]。

收稿日期: 2011-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(40801111); 国家重点基础研究发展规划(2007CB106803); 陕西省科学技术研究发展计划项目(2011kjxx25); 西北农林科技大学青年学术骨干支持计划

作者简介: 李学章(1984-), 男, 山东省临沂市, 硕士研究生, 主要从事环境科学研究。E-mail: lixuezhang99@163.com

通讯作者: 邵明安(1956-), 男, 湖南常德市, 博士, 研究员, 主要从事土壤物理学研究。E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

水分是干旱半干旱地区生态系统的限制因素,影响着生态系统功能、结构及其对环境变化的响应和适应,是目前生态学家关注的重要环境因素。水分变化对生态系统土壤呼吸有重要的影响,Davidson 等^[5]发现,放牧地土壤呼吸随着土壤水分含量的降低而降低;Lloyd 等^[6]认为,当土壤水分含量低于某一阈值时,土壤呼吸将受到影响。生态系统植被密度对生态系统过程具有重要作用,它不但影响地上部和地下部生物量及其分配,而且改变植物群体光合作用强度、根系数量和分布、根系呼吸等过程,进而影响土壤呼吸速率。目前,关于植物密度对生态系统过程影响的研究主要集中在光合特性和作物产量及品质方面,关于土壤呼吸与密度之间的关系尚不明确,而且缺乏相应的实验研究,而开展这方面的研究可以加深对土壤呼吸这一生态系统重要碳循环过程的认识。黄土高原水蚀风蚀交错带属于半干旱草原地带,是我国北方农牧交错带的重要组成部分,生态环境极为脆弱,降雨年季分布极不均匀,植被生长受到很大的限制。本研究以人工苜蓿和沙打旺草地为研究对象,通过分析不同水分和密度处理后土壤呼吸的季节变化特征,揭示人工草地土壤呼吸对水分和密度变化的响应,为该区人工草地有效调控和管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行,试验站位于陕北神木县以东 14 km 处的六道沟小流域,北依长城,位于毛乌素沙漠的边缘,流域植被退化严重,生态环境脆弱,属于典型的水蚀风蚀交错带^[7]。研究区海拔 1 094~ 1 274 m,年均降水量 437 mm,属于半干旱地区,年平均气温 8.4 °C, ≥ 10 °C 年积温 3 232 °C。研究区主要土壤类型为新黄土、红胶土、淤土、风沙土等。

1.2 试验设计与研究方法

研究设水分(对照、增水 50 mm)、密度(低密度 25 000 丛/hm²、高密度 50 000 丛/hm²)和植被类型(苜蓿、沙打旺)3 个因素共 8 个处理,重复 4 次。试验于 2008 年 9 月份在六道沟小流域布设,小区面积 4 m × 6 m,小区间保护行 0.5 m,每个小区种植 12 行,行距 50 cm,并在每年 10 月份对紫花苜蓿和沙打旺进行刈割。2010 年 5 月底,对小区进行密度和水分处理,并在每个小区设置 2 个 PVC 土壤呼吸测定圈,PVC 圈埋入土壤 2~ 3 cm,同时用埋在紧挨每个 PVC 圈的地温计测定土壤 5 cm 处温度,采用 FDR (ML2x, Delta-T Devices Ltd UK)测量 0~ 6 cm 深度土壤体积含水率。自 2010 年 6~ 10 月,在生长季每隔 10 d 左右,于 14:00 至 15:00 用 CI-340 系统测定土壤呼吸速率,生长季共测定 13 次。

1.3 数据处理

利用多元方差分析比较不同处理土壤呼吸速率之间的差异,用标准最小二乘法(SLQ)建立土壤呼吸速率与表层土壤水分和温度之间的耦合关系,并对土壤呼吸速率进行预测,所有数据处理均用 JMP 9 软件完成。

2 结果与分析

表 1 土壤呼吸对不同因素响应的方差分析

因素	DF	SS	F	P
植被	1	2.47	12.35	0.0007
水分	1	1.47	7.33	0.008
植被 × 水分	1	0.15	0.73	0.3936
密度	1	0.07	0.34	0.5612
植被 × 密度	1	0.17	0.83	0.3647
水分 × 密度	1	0.01	0.05	0.8264
植被 × 水分 × 密度	1	0.01	0.06	0.8086

2.1 水分增加对土壤呼吸的影响

水分对土壤呼吸有重要影响,土壤水分状况的改变会影响到植物根系的生长与分布,改变微生物的群落结构^[8],增加根生物量^[9]以及微生物的数量与活性^[10],进而影响根系和微生物的呼吸,从而改变土壤呼吸速率。增水处理苜蓿草地土壤呼吸速率介于 0.94~ 1.04 μmol/(m²·s)之间,平均值 0.98 μmol/(m²·s);未增水处理土壤呼吸速率介于 0.76~ 0.90 μmol/(m²·s)之间,

平均值为 0.82 μmol/(m²·s),增水处理使苜蓿草地的土壤呼吸速率平均提高 19.86% ($P < 0.01$) (表 1)。尽管水分增加显著提高了人工苜蓿草地土壤呼吸速率,但并没有改变土壤呼吸的季节变化特征(图 1)。增水与对照处理的呼吸速率在 6 月初分别为 1.25, 0.91 μmol/(m²·s);随着生长季的推进,6~ 7 月份干旱少雨,土壤含水量低,呼吸速率降低,此时水分成为土壤呼吸的限制性因子,但是 6 月底的一次 34.8 mm 降雨(占 6~ 7 月份总降雨量的 55.77%),极大地激发了土壤呼吸,呼吸速率分别升高到 1.41, 1.22 μmol/(m²·s),产生了一个呼吸峰值,这与其他研究结果相似^[11-12],如 Clark 等^[11]发现,大的降雨过程使 Pawnee 矮草草原 CO₂ 的排放量增加了 13 倍,Holt 等^[12]发现,旱季经过大的降雨后昆士兰北部土壤 CO₂ 的排放量增加 300%,表明长期缺水条件下,土壤呼吸对脉冲性降雨的响应极为敏感。8 月份后降雨量增多,土壤呼吸速率逐渐升高,8 月底达到第 2 个峰值,分别为 1.36, 1.20 μmol/(m²·s),之后随着生长季的结束逐渐降低。图 1 结果还表明,增水处理对

土壤呼吸的增加效应在降雨少的季节较大,而在降雨多的季节较小,如7,8月份降雨较多,增水处理后土壤呼吸增加了5%~17%,而6月份降雨较少,土壤呼吸增加了37%~67%。尽管9月份降雨量也较大,但此时生长季趋于结束,植物根系活动减弱,水分增加对土壤呼吸的影响已经体现不出。这些结果表明研究区人工苜蓿草地土壤呼吸主要受水分限制,水分增加对土壤呼吸的影响程度与不同季节的降雨量有关。

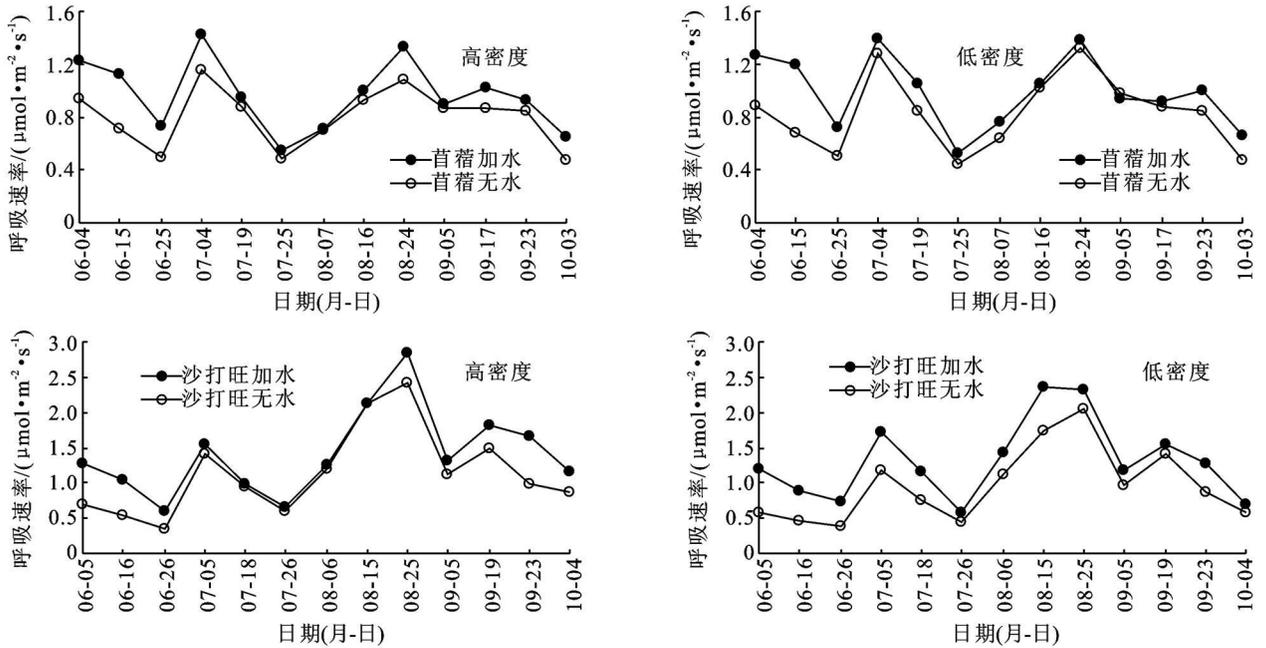


图1 不同处理土壤呼吸速率随时间的变化

沙打旺草地增水处理土壤呼吸速率在 $1.31 \sim 1.43 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间,平均 $1.36 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;对照处理土壤呼吸速率在 $0.94 \sim 1.16 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间,平均 $1.05 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,水分增加使沙打旺草地的土壤呼吸速率平均提高 29.77% ($P < 0.01$) (表 1)。人工沙打旺草地生长季土壤呼吸速率变化趋势也不受水分增加的影响,并且表现出与苜蓿草地相似的趋势(图 1),6~7 月份较低,其中由于 6 月底的脉冲性降水,产生了第一个土壤呼吸峰值,此后随着植被生长和降雨的增加,水分胁迫解除,呼吸速率升高,在 8 月底达到第 2 个峰值,随后逐渐降低,增水与对照处理人工沙打旺草地第 2 个峰值分别比第一个峰值高 58.27% 和 73.09%。与苜蓿草地相似,水分增加对沙打旺草地土壤呼吸的影响受生长季降雨的限制,在降雨较少的 6 月份,水分增加后土壤呼吸增加了 80%~93%,而在降雨丰沛的 7,8 月份,水分增加后土壤呼吸只增加了 16%~26%,表明研究区人工沙打旺草地土壤呼吸也主要受水分限制,水分增加对土壤呼吸的影响程度与不同季节的降雨量有关。

本研究中苜蓿和沙打旺草地生长季土壤呼吸速率变化规律呈双峰型分布,而其他研究结果表明生长季土壤呼吸呈单峰型分布^[13],本研究结果与其他研究结果的差异,可能与研究区域和植被类型的不同有关。本研究在位于半干旱地区的水蚀风蚀交错带进行,研究区土壤呼吸不仅受水分限制,而且与植物生长有关。本研究所观测到的土壤呼吸峰值可能是生长季降雨分配不均所引起的土壤水分状况变化引起的。

2.2 密度对土壤呼吸的影响

方差分析结果表明,水分处理和密度处理对苜蓿草地和沙打旺草地土壤呼吸速率没有交互影响(表 1)。高密度与低密度处理苜蓿草地土壤呼吸速率分别介于 $0.80 \sim 0.97 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $0.83 \sim 0.99 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间,其平均值分别为 $0.88, 0.91 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,不同密度处理苜蓿草地土壤呼吸差异不显著 ($P > 0.05$) (表 1),这与 Noh 等^[14]关于不同林分密度对赤松林 CO_2 排放的影响的研究结果相同;高密度与低密度处理沙打旺草地土壤呼吸速率分别介于 $1.14 \sim 1.41 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $0.97 \sim 1.32 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间,平均值分别为 $1.27, 1.14 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,不同密度之间差异显著 ($P < 0.05$) (表 1),说明密度对土壤呼吸速率的影响因植被类型不同而异。对苜蓿和沙打旺 2 种植物来说,虽然密度并没有影响生长季土壤呼吸速率的变化规律(图 1),但是高密度苜蓿草地土壤呼吸速率略低于低密度苜蓿草地的,而沙打旺草地的则与之相反,这与 Fu 等^[15]对黄土高原北部 2 种灌木林不同密度下土壤 CO_2 排放的研究结果一致,造成这种结果的原因可能是低密度的苜蓿草地单丛生长比较茂盛,光合作用强,对土壤呼吸有驱动作用^[16],而沙打旺草地主要是由于根系粗大,并且分布较浅,所以高密度处理呼吸速率较高。

2.3 土壤水分、温度与土壤呼吸的耦合关系

本研究中苜蓿和沙打旺人工草地土壤呼吸速率具有明显的季节变化特征, 最大值均出现在 8 月份。同样苜蓿和沙打旺人工草地土壤水分也呈现出了明显的季节变化(图 2), 并且在不同处理下其与土壤呼吸速率变化趋势相似, 土壤水分与土壤呼吸速率呈正相关关系(苜蓿: $r = 0.361, p < 0.0001, n = 208$; 沙打旺: $r = 0.600, p < 0.0001, n = 208$), 表明一定范围内土壤水分增加能够促进土壤呼吸。

许多研究认为土壤温度是土壤呼吸速率的限制性因子^[17], 本研究中, 8 月份之前由于天气干旱少雨, 土壤呼吸速率受水分限制, 此时土壤温度变化不大(图 2), 并且有部分温度偏高(超过 40 °C), 其与土壤呼吸速率没有明显的相关性; 8 月份后降雨增加, 其与土壤呼吸速率的相关性增强, 同时在土壤温度的整个季节变化过程中, 其与土壤呼吸速率的最大值并不同步。这也表明在水蚀风蚀交错带, 人工草地土壤呼吸主要受水分限制, 当水分限制解除后, 土壤呼吸便受温度限制。

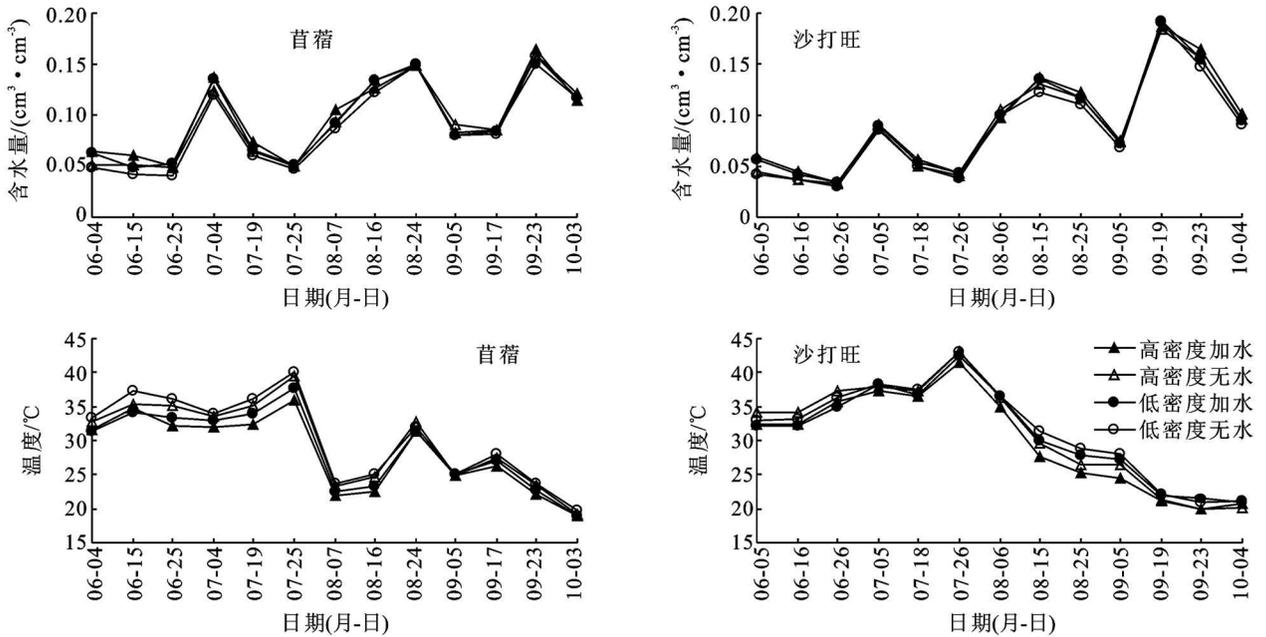


图 2 不同处理表层土壤水分和温度随时间的变化

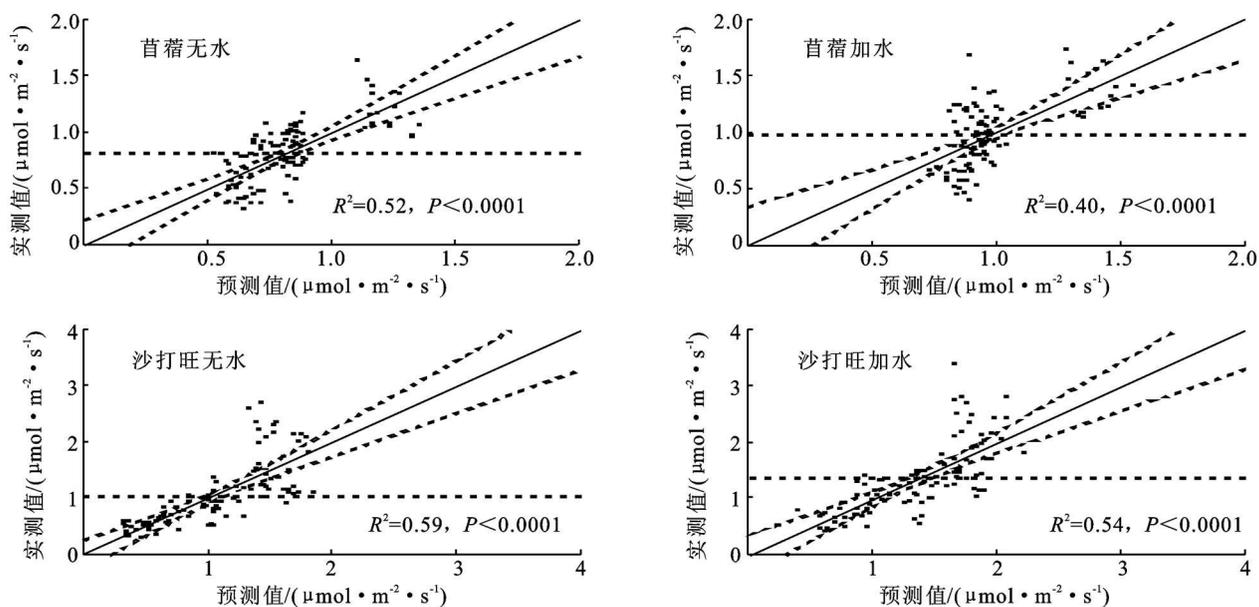
为了深入分析人工草地土壤呼吸与表层土壤水分和温度之间的耦合关系, 对土壤呼吸和表层土壤水分和温度进行了线性回归(表 2)。回归结果表明, 加水后土壤呼吸与表层土壤水分和温度关系的截距从 2.15 降低到 1.52, 加水与无水处理土壤表层水分对土壤呼吸影响的斜率分别为 -0.12 和 -0.18, 而土壤表层温度对其影响的斜率分别为 -0.03 和 -0.05, 表明土壤表层水分含量对苜蓿草地土壤呼吸的影响大于土壤表层温度的影响, 是影响苜蓿草地土壤呼吸的主要因子, 加水后减小了土壤呼吸对水分和温度的依赖, 缓解了研究区苜蓿草地土壤呼吸所受到的水分限制。

表 2 土壤呼吸与土壤表层水分和温度之间的回归参数

处理		截距		水分		温度		水分×温度	
		估计值	显著值	估计值	显著值	估计值	显著值	估计值	显著值
苜蓿	无水	2.153	< 0.0001	-0.183	< 0.0001	-0.052	< 0.0001	0.007	< 0.0001
	加水	1.517	0.0009	-0.12	0.003	-0.029	0.037	0.006	< 0.0001
沙打旺	无水	1.862	0.0001	-0.151	0.0002	-0.055	< 0.0001	0.009	< 0.0001
	加水	2.351	< 0.0001	-0.157	0.005	-0.063	< 0.0001	0.009	< 0.0001

与苜蓿草地相反, 沙打旺草地加水后增加了土壤呼吸对表层土壤水分和温度的依赖。加水处理沙打旺草地土壤呼吸与水分和温度的回归关系的截距从 1.86 增加到 2.35, 加水处理土壤表层水分和土壤表层温度对其影响的斜率分别为 -0.16 和 -0.06, 无水处理土壤表层水分和温度对其影响的斜率分别为 -0.15 和 -0.06, 土壤表层水分对沙打旺草地土壤呼吸影响的斜率都大于土壤表层温度对其影响的斜率, 同样表明水分是沙打旺草地土壤呼吸的限制因子, 而且加水没有改变土壤呼吸对表层土壤水分和温度的依赖, 这可能是因为沙打旺草地耗水较大^[18], 而本研究中所补充的水分较少, 没有缓解水分的限制。土壤呼吸与水分和温度的耦合关系对水分增加的特征随植物种类的不同可能是由于不同植物对水分的需求不同所造成的。

通过上述建立的土壤呼吸与水分和温度的耦合关系(表2),利用水分和温度对土壤呼吸进行预测(图3),预测值与实测值极显著正相关,而且主要分布于1:1线附近,表明研究区土壤呼吸主要依赖于表层土壤水分和温度,而且本研究所获得的土壤呼吸与表层土壤水分和温度之间的耦合关系可用于研究区人工草地土壤呼吸的预测。图3结果表明,苜蓿草地无水处理土壤呼吸对水分和温度的依赖度为52% ($R^2 = 0.52$),加水后降为40%;而沙打旺草地无水处理土壤呼吸对水分和温度的依赖度为59%,加水后降为54%,这与表2结果相吻合。



注:水平虚线为实测平均值,实线为1:1线,虚线区间为95%置信度区间。

图3 土壤呼吸实测值与预测值的关系

3 结论

黄土高原水蚀风蚀交错带人工草地土壤呼吸速率因草地类型不同而异,沙打旺草地生长季土壤呼吸平均速率比苜蓿草地的高34%。水分增加显著促进了人工草地土壤呼吸速率,且水分的作用在旱季显著高于雨季,但水分增加未改变人工草地土壤呼吸的季节变化特征。密度加倍使沙打旺草地生长季的土壤呼吸平均速率增加了11%,而对苜蓿草地土壤呼吸速率影响不显著。研究区人工草地土壤呼吸受水分限制,当水分限制解除后,温度便成为土壤呼吸的限制因子。土壤呼吸与表层土壤水分和温度有着显著的耦合关系,这种耦合关系可用于预测研究区人工草地土壤呼吸。加水减小了苜蓿草地土壤呼吸对水分和温度的依赖,而未改变沙打旺草地土壤呼吸对表层土壤水分和温度的依赖。

参考文献:

- [1] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 23-36.
- [2] 刘兴元, 龙瑞军, 尚占环. 草地生态系统服务功能及其价值评估方法研究[J]. *草业学报*, 2011, 20(1): 167-174.
- [3] 齐玉春, 董云社, 刘立新, 等. 内蒙古锡林河流域主要针茅属草地土壤呼吸变化及其主导因子[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2010, 40(3): 341-351.
- [4] 周萍, 刘国彬, 薛蕙. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. *草业学报*, 2009, 18(2): 184-193.
- [5] Davidson E A, Verchot L V, Cattadnio J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 53-69.
- [6] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. *Functional Ecology*, 1994, 8: 315-323.
- [7] 唐克丽, 侯庆春, 王斌科, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向[J]. *中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊*, 1993(12): 1-15.
- [8] Mclean M A, Huhta V. Temporal and spatial fluctuations in moisture affect humus microfungus community structure in microcosms[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 114-119.
- [9] 张喜旺. 宁南山区干草原地下生物量与降水量的相关分析[M]. *环境保护与治理*, 2002(9): 44-45.
- [10] Rosacker L L, Kieff T L. Biomass and adenylate energy charge of a grassland soil during drying[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1990, 22: 1121-1127.

下转第216页

变化幅度不一。pH 表现为各泉水 pH 都表现为雨季低、旱季高,后沟泉水 pH 值略高于另外 2 个泉水。泉水的平均电导率为:柏树湾泉水< 兰花沟泉水< 后沟泉水,其中后沟泉水电导率月变化幅度最大。

(2) HCO_3^- 和 Ca^{2+} 为表层岩溶水中的主要离子,但是随着土地利用方式的转变,植被覆盖的减少,石漠化程度的加重,下伏泉水中的 HCO_3^- 浓度及 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 的比例都逐渐减少。

(3) 农业活动过程中农药和肥料的使用可能是表层岩溶水 NO_3^- 的主要来源。大气沉降、岩性及农业活动都对泉水中 SO_4^{2-} 的浓度有一定的贡献。 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 除部分受岩性影响外,也受人为活动的影响。随着土地利用方式的转变,基岩裸露率增加,植被覆盖率降低,增加了降雨和径流对地表物质和土壤的冲刷、悬浮和运移作用,加速了土壤的侵蚀速率,造成大量的土壤颗粒和可溶性物质运移进入表层岩溶水中,从而导致其下伏泉水中各种离子浓度的增加。

(4) 3 个泉水的 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 浓度都是后沟泉水> 兰花沟泉水> 柏树湾泉水,这和基岩裸露率有很好的正相关,和植被覆盖状况呈负相关。这些发现说明,电导率、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 HCO_3^- 等泉水水化学指标可以作为不同土地利用方式和植被覆盖变化的重要指标。

参考文献:

- [1] 覃小群,蒋忠诚.表层岩溶带及其水循环的研究进展与发展方向[J].中国岩溶,2005,24(3):250-254.
- [2] Liu Z H, Li Q, Sun H L, et al. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: Soil CO_2 and dilution effects[J]. Journal of Hydrology, 2007, 337(1/2): 207-223.
- [3] 刘再华, Wolfgang D. 岩溶作用动力学与环境[M].北京:地质出版社,2007:151-159.
- [4] 李林立,况明生,张远瞩,等.典型表层岩溶水短时间尺度动态变化规律[J].水科学进展,2006,17(2):222-226.
- [5] 蒋忠诚,王瑞江,裴建国,等.我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能[J].中国岩溶,2001,20(2):106-110.
- [6] 梁小平,朱志伟,梁彬,等.湖南洛塔表层岩溶带水文地球化学特征初步分析[J].中国岩溶,2003,22(2):103-109.
- [7] 李强,孙海龙,汪进良.典型表层岩溶水化学对暴雨响应特征研究[J].水资源保护,2008,24(2):14-17.
- [8] Boyer D G, Pasquarell G C. Nitrate concentrations in karst springs in an extensively grazed area[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1995, 31(4): 729-736.
- [9] Mahvi A H, Nouri J, Babaei A A, et al. Agricultural activities impact on groundwater nitrate pollution[J]. Int. J. Environ. Sci. Tech., 2005, 2(1): 41-47.
- [10] 刘方,王世杰,罗海波,等.喀斯特石漠化过程中植被演替及其对径流水化学的影响[J].土壤学报,2007,54(2):37-43.
- [11] 蒋勇军,袁道先,谢世友,等.典型岩溶农业区地下水水质与土地利用变化分析[J].地理学报,2006,61(5):471-481.
- [12] 章程,袁道先.典型岩溶地下河流域水质变化与土地利用的关系[J].水土保持学报,2004,18(5):134-137.
- [13] 陈怀满.环境土壤学[M].北京:科学出版社,2005.
- [14] 赵新峰,陈法锦,陈建耀,等.城市地下水硝酸盐污染及其成因分析:以珠海香洲区为例[J].水文地质工程地质,2008(3):87-92.

上接第 211 页

- [11] Clark F E, Coleman D C. Secondary productivity below ground in Pawnee grassland[R]. US/ IBP Grassland Biome Tech. Rep. No. 169. Colorado State University, Fort Collins, 1972.
- [12] Holt J A, Hodgen M J, Lamb D. Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, north Queensland[J]. Australian Journal of Soil Research, 1990, 28(5): 737-745.
- [13] 张丽华,陈亚宁,李卫红,等.干旱荒漠区不同土地利用/覆盖类型土壤呼吸速率的季节变化[J].中国科学 D 辑:地球科学,2006,36(增刊 II):68-76.
- [14] Noh N M, Son Y, Lee S K, et al. Influence of stand density on soil CO_2 efflux for a *Pinus densiflora* forest in Korea[J]. Journal of Plant Research, 2010, 123(4): 411-419.
- [15] Fu W, Huang M, Shao M, et al. Soil carbon dioxide (CO_2) efflux of two shrubs in response to plant density in the northern Loess Plateau of China[J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(41): 6916-6926.
- [16] Fernando E M, Werner L K, Ernst D S. Response of mycorrhizal, rhizosphere and soil basal respiration to temperature and photosynthesis in a barley field[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39: 843-853.
- [17] 严俊霞,秦作栋,张义辉,等.土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J].生态学报,2009,29(12):6366-6376.
- [18] 张晓红,王惠梅,徐炳成,等.黄土塬区 3 种豆科牧草对土壤水分的消耗利用研究[J].西北植物学报,2007,27(7):1428-1437.