

# 缙云山针阔混交林土壤呼吸速率对降水输入量变化的响应

张英俊<sup>1</sup>, 王云琦<sup>1,2,3</sup>, 张会兰<sup>1,3</sup>, 魏天兴<sup>1</sup>, 王玉杰<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083; 3. 北京林业大学水土保持学院重庆缙云山生态站, 重庆 400702)

**摘要:** 为探讨亚热带季风性湿润气候地区降水对土壤呼吸的影响, 于2014年选取重庆市缙云山自然保护区内针阔混交林为研究对象, 通过人为拦挡和增水方式模拟不同降水输入量对土壤呼吸速率的影响, 包括达到土壤含水量的70% (增水70%, 70% A), 100% (增水100%, 100% A), 130% (增水130%, 130% A) 及对照(CK)和零降水(Z)5种情况。结果表明: (1)不同降水处理下土壤呼吸速率日变化均呈单峰变化曲线, 并在12:00—14:00之间达到最大值; 其年内月变化也为单峰曲线, 于8月份达到最大值, 12月份达到最小值。 (2)适当增水可以提高土壤呼吸速率与10 cm深度土壤温度的Pearson相关性, 但指数模型的拟合度以对照组最好, 减水和过度增水都会减少其相关性; 温度敏感性 $Q_{10}$ 值的变化情况与其相同。 (3)土壤呼吸速率与10 cm深度的土壤含水量的相关性总体很低, 但明显受到土壤水分条件影响, 除零降水处理表现为极显著正相关外, 对照组几乎不相关, 增水处理转为明显的负相关, 尤其增水130%后呈显著负相关。 (4)在研究地区的自然环境条件下, 增水100%时提高了土壤呼吸速率, 也扩大了其变化范围, 减水明显降低了土壤呼吸速率。

**关键词:** 针阔混交林; 土壤呼吸; 降水; 土壤温度; 土壤含水量

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0134-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.023

## The Influence of Different Water Input on Soil Respiration in Mixed Broadleaf-conifer Jinyun Mountain

ZHANG Yingjun<sup>1</sup>, WANG Yunqi<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Huilan<sup>1,3</sup>, WEI Tianxing<sup>1</sup>, WANG Yujie<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Beijing Soil and Water Conservation Engineering Technology Research Center, Beijing, 100083; 3. Chongqing Jinyun Mountain Ecological Station, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Chongqing 400702)

**Abstract:** To explore the various degree water input influence on soil respiration in subtropical monsoon climate region, selected mixed broadleaf-conifer forest of Chongqing Jinyun Mountain Nature Reserves as the research object in 2014. The artificial blocking and increasing water were used to simulate different precipitation input, and then to analyze the impact (including 70% of saturated soil water content (addition 70%, 70% A), 100% (addition 100%, 100% A), 130% (addition 130%, 130% A), comparison (CK) and no precipitation (Z)). The result shows that: (1) All the diurnal changes of soil respiration formed a curve under the different water inputs, and it reached the maximum value during 12:00 to 14:00; and the same as monthly variation, it reached the maximum value in August and the minimum value in December; (2) Properly increased water could improve the Pearson correlation between soil respiration rate and soil temperature of 10 cm soil depth, but the best fitting of exponential model was comparison group. Reducing water and excessive increase water would reduce its correlation; the same as the temperature-sensitivity coefficient  $Q_{10}$ ; (3) The correlation of soil respiration rate and soil water content of 10 cm soil depth was low as a whole, but the influence was obvious. In addition to no precipitation showed significantly positive correlation, it almost off the mark between comparison and water content, and it negatively correlated between water addition and water content, especially the addition 130% was marked negative correlation; (4) In General, water addition 100% improved the soil respiration rate, expanded its excursion, water reduction reduced the soil respiration rate in the study region nature environment.

收稿日期: 2016-09-01

资助项目: 国家“十三五”科技支撑计划子课题“三峡库区城郊防护林结构调控与高效经营技术”(2015BAD07B040304)

第一作者: 张英俊(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态地理学研究。E-mail: 1176564829@qq.com

通信作者: 王玉杰(1960—), 男, 内蒙赤峰人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀、林业生态工程研究。E-mail: wyujie@bjfu.edu.cn

**Keywords:** mixed broadleaf-conifer forest; soil respiration; precipitation; soil temperature; soil water content

全球碳循环研究中,陆地生态系统下垫面的复杂性及人类活动的强烈干扰使其具有极大不确定性<sup>[1]</sup>,故陆地生态系统的碳循环是学者们的重点研究对象之一<sup>[2]</sup>。土壤呼吸是陆地碳循环的重要组成部分<sup>[3]</sup>,是森林碳循环的重要环节之一<sup>[4]</sup>,对其评估的准确性会直接影响到陆地碳源碳汇的准确评估。全球气候变化对我国降水量、降水格局以及包括降水频率与强度在内的降水分配产生了显著影响<sup>[5]</sup>,气候变化的研究表明,全球范围内极端的降水事件和周期性的干旱将会更加频繁与普遍<sup>[6]</sup>。降水对生态系统地下生物化学过程具有重要的调控作用,会对土壤呼吸产生直接的影响<sup>[7]</sup>。因此,在全球气候变化下研究降水对土壤呼吸的影响具有重要意义。

国外对土壤呼吸的研究始于19世纪初,主要集中在欧洲和北美。20世纪70年代开始,众多研究集中在温带森林、温带草原、亚热带森林和印度热带草原,并提出众多影响因子,目前土壤温度对其影响研究较多<sup>[8-9]</sup>。国内研究起步较晚,主要针对热带雨林、亚热带森林<sup>[11]</sup>、北方森林<sup>[12]</sup>、北方草原和西藏高寒草原。降水对土壤呼吸的研究发现,降水的影响因时因地而有所差异。Sponseller等<sup>[12]</sup>在索诺兰沙漠中研究发现,降雨过后土壤呼吸有所上升,但会在48 h内回降。Kim等<sup>[13]</sup>发现短期内大尺度的干湿交替变化会影响到土壤碳排放。Escobar等<sup>[14]</sup>在半干旱草原中研究发现,土壤呼吸速率在干旱季节明显低于湿润季节。Aanderud等<sup>[15]</sup>还发现,土壤呼吸对降雨变化的敏感性会因植被而降低。国内关于降水对土壤呼吸的影响研究,主要包括董云社等<sup>[16]</sup>研究的内蒙古4种草地在不同降水强度下土壤呼吸的变化特征,张丽华等<sup>[17]</sup>研究的人工降水变化对准噶尔盆地两种荒漠群落土壤呼吸的影响,吕文强等<sup>[18]</sup>对喀斯特地区的研究表明,不同强度降水事件后的土壤呼吸速率有显著差异。

长江三峡库区对我国西南地区具有重要的生态意义,近年来我国学者对三峡库区土壤呼吸展开了大量研究,包括常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林、毛竹林土壤呼吸特征及其环境因子的影响<sup>[19-23]</sup>,另外孙素琪等<sup>[24]</sup>研究了常绿阔叶林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应,但关于降水对土壤呼吸的影响还鲜见报道。鉴于重庆三峡库区常年降水量丰富,暴雨、强降雨频发,但每年7—8月常出现伏旱天气,因而研究降水变化对土壤呼吸的影响具有重要意义。

## 1 研究区概况

缙云山(106°17'—106°24' E, 29°41'—29°52' N)位于

重庆市北碚区、沙坪坝区、璧山县境内,嘉陵江小三峡之温塘峡西岸;总面积76 km<sup>2</sup>,海拔200~952.5 m,为华蓥山腹式背斜山脉一个分支的一段。缙云山位于长江和嘉陵江两江之间,地表水系十分复杂,主要河流有长江、嘉陵江、綦江、涪江、乌江、大宁河等,水资源丰富。缙云山的土壤以三叠纪须家河组厚层石英砂岩、炭质页岩和泥质砂岩为母质风化而成的酸性黄壤及水稻土为主。山麓地区为侏罗纪由紫色砂页岩夹层上发育的中性或微石灰性的黄壤化紫色土。保护区具亚热带季风湿润性气候特征,年均气温13.6℃,最热月(8月)平均气温24.3℃,最冷月(1月)平均气温3.1℃,>10℃年积温为4 272.4℃;相对湿度年均87%,年均降水量1 611.8 mm,年均蒸发量777.1 mm,夏半年(4—9月)降水量1 243.8 mm,占全年的77.2%;雾日数年均89.8 d,年均日照时数低于1 293 h。

缙云山国家级自然保护区为重庆市北大门的天然绿色屏障,被称为重庆的肺叶和主城区附近的天然氧吧。缙云山森林覆盖率已达96.6%。保护区内有大面积的常绿阔叶林,有多种具代表性的生态系统,是一个典型的亚热带常绿阔叶林的生态综合体物种基因库。缙云山物种多样性丰富,有长江流域保存较好的典型的亚热带常绿阔叶林景观和相对稳定的生态系统,保存了许多古老的分类上孤立、形态特殊的植物。

## 2 研究方法

### 2.1 样地布设

本研究所选样地为常绿阔叶林天然林,海拔约795 m,坡度约12°,西北坡向,郁闭度0.9,林内主要树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、四川山矾(*Symplocos setchuensis*)。在林分内相对平坦处随机布设3个区组,组间间隔在10 m以上。3个区组试验处理方式一致,彼此作为重复对照,以减少数据的偶然性。在每个区组内设置5块大小为2 m×2 m的样方,样方之间的距离在3 m以上,以防彼此之间造成干扰。在样地内布设土壤呼吸测量环,测量环用PVC管制成,规格为外径20 cm,内径19.5 cm,高11 cm。在不破坏土壤结构的前提下,将PVC环插入土中,保持PVC环截面与竖轴垂直,并露出地面高约2 cm,静置48 h后进行测量。

样地设置主要包括以下5个处理:零降水(记为Z)、空白对照(CK)、增水70%(70%A)、增水100%(100%A)、增水130%(130%A)。其中零降水处理即通过阻挡林下穿透雨来模拟零降水时土壤呼吸的变化情况,措施为在样地上方搭盖挡雨架。具体操作方法为将2.3 m×2.4 m的透明塑料薄膜的两长对

边都回折 0.5 cm,用电熨斗高温烫接,使之形成直径为 1 cm 的空心管,再将 2 根长为 2.4 m 的 8 号铁丝分别贯穿到空心管,两端余 0.05 m,并将其弯曲形成圆圈,便于绳子穿过并固定,绳子的另一头系于土壤环周围的树木上,从而在样地上方形成一个减水支架。空白对照处理即不做任何处理。增水处理为:于区组内按照样方原则选择 3 块样地作为增雨样方,并于每月的上、中、下旬各选一天,于凌晨 4:00 使用喷洒装置对样地进行均匀喷水。增水量的确定方法为:理论上能达到当地土壤饱和含水量的 70%,100%,130%,从而达到模拟增加降雨的效果。为防增加水量对其他样方的土壤水分环境造成干扰,5 种处理样地的相对高度为:零降水>对照>增水 70%>增水 100%>增水 130%。

## 2.2 试验方法

2.2.1 饱和含水量的测定 采用环刀法测定土壤饱和含水量:首先挖出土壤剖面,用环刀取土,取土后称重( $m_1$ );然后将带土环刀放入水中吸水,大约在 8~10 h 土壤饱和后取出环刀,测其重( $m_2$ );最后将带土环刀放入烘箱烘干至恒重,测其重( $m_3$ ),取出土样,称得环刀重( $m_0$ )。土壤含水量计算公式如下:

$$\text{自然含水量} = (m_1 - m_3) / (m_3 - m_0) \times 100\%$$

$$\text{饱和含水量} = (m_2 - m_3) / (m_3 - m_0) \times 100\%$$

2.2.2 土壤呼吸的测定 用 LI-8100 开路式土壤碳观测系统,于 2014 年 6 月—12 月,选择每月的上、中、

下旬各两天晴朗天气,进行土壤呼吸测量;无晴天时选择连续阴天测量,每次重复测定两次。日变化数据为每月选择一天晴朗天气,于 6:00—20:00 进行测量,每 2 h 测定一次。测定土壤呼吸的同时,用 TW-II 型土壤温湿度测量仪,测定土壤深度 5 cm 和 10 cm 处的土壤温度和含水量,用空气温度计测定大气温度,用 PH300 型便携式 pH 计测量土壤 pH 值。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同降水输入量条件下土壤呼吸的日变化特征

为分析针阔混交林在不同降水输入量下的土壤呼吸日变化特征,选择作为植物生长季中期的 8 月上、中、下旬晴朗天气各一天,分析土壤含水量和土壤呼吸的日变化(图 1)。由图 1 可以看出,土壤含水量表现为减水组 and 对照组整体比较稳定,且减水组低于对照组,也比对照组更稳定,波动更小;增水组呈现出增水越多土壤含水量越高的规律,且其土壤含水量均随时间延长而逐渐下降,彼此间差距也逐渐缩小,并在最后达到相对接近的状态。这是因为减水组阻拦了降水,使土壤含水量长期处于较低状态;对照组为自然状态,虽整体比较稳定,但大致呈现先增加后降低再增加的变化趋势,与缙云山林间空气湿度变化一致;增水组测试前期的增水导致其刚开始的土壤含水量高,随后由于受土壤下渗、径流、蒸发等水文过程的影响而不断降低,但总体还是呈现增水 130%>增水 100%>增水 70%>对照>零降水的变化趋势。

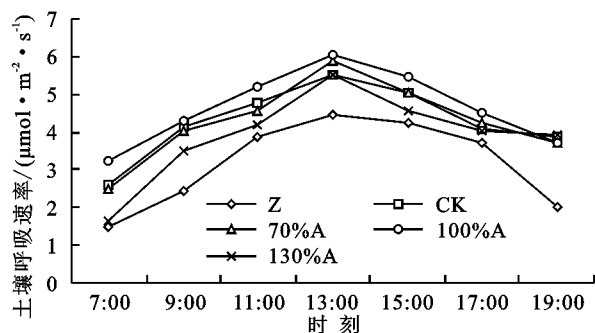


图 1 不同降水输入量条件下土壤呼吸速率与土壤含水量的日变化特征

在不同降水输入量条件下,土壤呼吸速率的日变化一致,均为单峰曲线,峰值均出现在 12:00—14:00 之间,CK, Z, 70% A, 100% A, 130% A 处理分别为 5.54, 4.46, 5.86, 6.02, 5.53  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。其最小值均出现在凌晨 6:00—8:00 之间,分别为 2.59, 1.47, 2.49, 3.24, 1.67  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由此可见,土壤呼吸速率明显受温度影响,尤其是零降水组。缙云山常绿阔叶林内的温度在清晨低,下午 2:00 左右达到最高,这与土壤呼吸的变化比较一致。整体来说,不同降水输入量条件下的土壤呼吸速率大小顺序为:100% A>CK>70% A>130% A>Z,且傍晚时除零降水组土壤呼吸速率明显低于其他组外,其他 4 组

因土壤含水量逐渐相同而十分接近。5 种处理土壤呼吸速率的日均值大小顺序为:100% A>CK>70% A>130% A>Z(表 1);变幅为增水 130% 的最大,增水 100% 的最小;变异系数为零降水的最大,增水 100% 的最小。

表 1 不同处理土壤呼吸速率的日变化

单位:  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

| 处理     | 平均值  | 标准差   | 最大值  | 最小值  | 变幅   | 变异系数  |
|--------|------|-------|------|------|------|-------|
| Z      | 3.16 | 1.091 | 4.46 | 1.47 | 2.99 | 0.345 |
| CK     | 4.29 | 0.882 | 5.54 | 2.59 | 2.95 | 0.206 |
| 70% A  | 4.27 | 0.985 | 5.86 | 2.49 | 3.37 | 0.231 |
| 100% A | 4.62 | 0.912 | 6.02 | 3.24 | 2.78 | 0.197 |
| 130% A | 3.91 | 1.090 | 5.53 | 1.67 | 3.86 | 0.278 |

3.2 不同降水输入量条件下土壤呼吸的月变化特征

为分析不同降水输入量条件下的土壤呼吸速率月变化特征,用 2014 年每月测得的所有数据求取算术平均值,代表各月土壤呼吸速率值(图 2)。由图 2 可以看出,不同降水输入量条件下的土壤呼吸速率月际变化均呈现明显一致的变化趋势:6—8 月上升,9 月降低,10 月略微上升,然后持续下降。总体而言,为先上升后下降的单峰曲线,与缙云山当地的温度变化一致,但在 9 月有微小波动,这是因为 2014 年缙云山 9 月降雨较多,导致林内气温长期较低,从而使土壤呼吸速率较低;2014 年 10 月降雨减少,温度稍有上升,土壤呼吸速率也随之有所上升。处理 Z,CK,70%A,100%A,130%A 的土壤呼吸速率各月平均值分别为 2.76,4.18,4.17,4.50,3.69  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,大小排序为  $Z<130\%A<70\%A<CK<100\%A$ ;在 8 月份均达到最大值,分别为 4.33,5.93,5.83,6.21,5.01  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,大小排序与平均值相同;12 月份均达到最小值,分别为 1.03,1.56,1.72,1.97,1.27  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,大小排序为  $Z<130\%A<CK<70\%A<100\%A$ 。

总体来说,在研究月份中,土壤呼吸速率在植物主要生长季的 6—8 月份较高,主要是因为此时的水热条件均好,植物生长旺盛,根系呼吸作用强,土壤微生物活性较高,促进了土壤呼吸作用,同时较高的温度还能提高有机物相关分解酶的活性,促进有机物分解,提高土壤呼吸速率。9 月份降水较多,导致了温度降低,使得土壤呼吸速率较低;在 11 月份和 12 月份,随着林内温度降低,土壤微生物和根系活动减弱,土壤呼吸速率也明显下降。

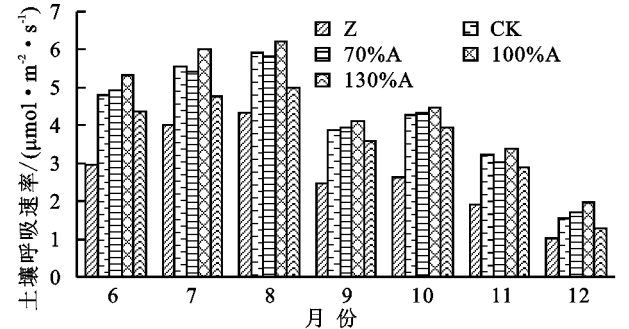


图 2 不同降水输入量条件下土壤呼吸速率的月变化

3.3 不同降水输入量条件下土壤温度对土壤呼吸的影响

3.3.1 土壤呼吸与 10 cm 深度土壤温度的相关性  
从土壤呼吸速率的日变化和月变化可看出,温度对土壤呼吸速率的影响显著,不同降水处理下的土壤呼吸速率的日变化与月变化都呈现与土壤温度相同的变化趋势。因为温度几乎影响土壤呼吸的各个组分,通过直接或间接作用而影响到根系呼吸、微生物和动物呼吸、凋落物分解,温度甚至能在土壤团聚体水平上

通过影响底物而间接影响土壤呼吸<sup>[25]</sup>,所以温度在土壤呼吸研究中一直受到广泛关注<sup>[26]</sup>。

采用 Pearson 相关系数描述了土壤呼吸与土壤温度关系的密切程度(表 2)。由表 2 可以看出,各处理下土壤呼吸速率与土壤 10 cm 温度在 0.01 的水平上呈显著正相关。其中,70%A 处理相关性最强,相关系数为 0.813;130%A 处理相关性最弱,相关系数为 0.681,但仍有较好的相关性。不同处理下土壤呼吸与土壤 10 cm 温度的相关性顺序为 70%A>CK>100%A>Z>130%A,可见,降水过多时会明显降低土壤呼吸与温度的相关性,但降水过少同样会降低其与温度的相关性。

表 2 不同降水输入量条件下土壤呼吸速率与土壤 10 cm 温度的 Pearson 相关性

| 降水处理  | Pearson 相关性 | 显著性(双侧) |
|-------|-------------|---------|
| Z     | 0.703**     | 0.000   |
| CK    | 0.805**     | 0.000   |
| 70%A  | 0.813**     | 0.000   |
| 100%A | 0.790**     | 0.000   |
| 130%A | 0.681**     | 0.000   |

注:\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3.3.1 土壤呼吸与 10 cm 深度土壤温度的指数拟合模型  
对不同降水处理的土壤呼吸速率与土壤 10 cm 温度进行回归分析,发现均具有显著相关性( $p<0.05$ )。本文采用常用的指数模型  $R_s = ae^{bT}$  (其中  $a$  是温度为 0℃时的土壤呼吸速率, $b$  是温度反应系数)拟合土壤呼吸速率( $R_s, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )随温度( $T, ^\circ\text{C}$ )的变化。回归分析结果表明(表 3),不同处理均存在极显著相关。其中,自然状态下对照处理的相关性最好;改变降水输入,则明显降低了土壤呼吸速率与土壤温度的相关性,一方面降水增加,使得水分作用加强和温度影响减弱;另一方面减少降水,导致土壤干旱限制土壤呼吸的作用增强,从而使得土壤呼吸速率与土壤温度的相关性下降。

土壤呼吸敏感性指数  $Q_{10}$  反映了土壤呼吸过程对土壤温度变化的敏感性,即土壤温度每升高 10℃土壤呼吸的变化比率。从表 3 可看出,不同降水处理的  $Q_{10}$  大小顺序为 70%A(1.597)>100%A(1.578)>CK(1.465)>Z(1.307)>130%A(1.292)。由此可以看出,在本文研究条件下,适当增加降水有助于提高土壤呼吸的温度敏感性,但增加降水过多导致土壤水分过多,反而会使其敏感性降低。

3.4 不同降水输入量条件下土壤含水量对土壤呼吸的影响

土壤水分状况改变会影响到植物根系分布深度、微生物群落组成、根系呼吸等,从而对土壤呼吸产生显著影响。也正因如此,降水对土壤呼吸的影响是一

个极其复杂的过程,不少研究者针对大气降水的短期过程对土壤呼吸影响做了一定的研究,陈全胜等<sup>[27]</sup>将文献中的解释主要归纳为 4 个方面:(1)替代效应:大气降水沿土壤孔隙下渗或侧渗,取代土壤孔隙中空气的位置,促使包括 CO<sub>2</sub> 在内的空气排出,从而短期内会增加土壤呼吸;(2)阻滞效应:水分取代土壤中的空气,降低土壤通透性,使得 CO<sub>2</sub> 扩散阻力增大,从而排放量减少和表现为土壤呼吸降低;(3)对微生物活动的刺激效应:在一定范围内的水分增加会促进微生物活动,使其呼吸量增加,土壤呼吸随之增加;(4)微生物生物量激增效应:在雨后,微生物数量激增,土壤呼吸增加。由此可见,水分增加对土壤呼吸有促进和抑制两种相反的作用。

表 3 不同降水输入量条件下土壤呼吸速率与 10 cm 深度土壤温度的相关性

| 降水处理 | 回归方程                  | R <sup>2</sup> | Q <sub>10</sub> | p     |
|------|-----------------------|----------------|-----------------|-------|
| Z    | $y=1.5719e^{0.0268x}$ | 0.5181         | 1.307           | <0.05 |
| CK   | $y=1.8964e^{0.0382x}$ | 0.6610         | 1.465           | <0.05 |
| A    | $y=1.6869e^{0.0468x}$ | 0.6474         | 1.597           | <0.05 |
| A    | $y=1.8163e^{0.0456x}$ | 0.6314         | 1.578           | <0.05 |
| A    | $y=2.1856e^{0.0256x}$ | 0.5179         | 1.292           | <0.05 |

在本研究中,土壤呼吸速率与 10 cm 深度土壤含水量的 Pearson 相关性分析表明(表 4),在零降水处理时,土壤呼吸速率与土壤含水量在 0.01 水平上呈极显著正相关;增水 130%时,土壤呼吸和土壤含水量在 0.05 水平上显著负相关;对照组的土壤呼吸与土壤含水量几乎无相关性;增水 70%和 100%时,土壤呼吸和土壤含水量的相关性也很低,相关不显著。这是因研究地点的降水量较高,使土壤含水量保持在较高水平,因此土壤含水量不是土壤呼吸的主要限制因子,作用很小;零降水处理使土壤水分不足的限制作用显著,在含水量较高时土壤呼吸速率会增加,从而呈极显著正相关;但增水处理使土壤空气含量减少,限制了微生物和根系的活动,导致土壤呼吸降低,表现为其与土壤含水量呈负相关,尤其增水 130%时表现出显著负相关。

表 4 不同降水输入量条件下土壤呼吸速率与 10 cm 深度土壤含水量的 Pearson 相关性

| 降水处理   | Pearson 相关性 | 显著性(双侧) |
|--------|-------------|---------|
| Z      | 0.504**     | 0.009   |
| CK     | -0.078      | 0.703   |
| 70% A  | -0.264      | 0.193   |
| 100% A | -0.113      | 0.584   |
| 130% A | -0.403*     | 0.041   |

注:\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;\*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

4 结论

(1)在不同降水输入量处理条件下,土壤呼吸速

率的日变化大致相同,均呈单峰曲线;月变化也总体一致,均呈现先上升后下降的单峰曲线;土壤呼吸的日变化和月变化均与温度变化一致,表明温度是该研究地点土壤呼吸速率变化的主要影响因子。

(2)土壤呼吸速率与土壤温度有较好相关性,但受到水分条件的影响。不同水分处理的土壤呼吸速率与 10 cm 深度的土壤温度的 Pearson 相关系数大小排序为 70% A(0.813)>CK(0.805)>100% A(0.790)>Z(0.703)>130% A(0.681),表明适当降水可增加与土壤温度的相关性,但过度增加降水和减少降水都会降低与土壤温度的相关性。采用指数模型能较好的拟合土壤呼吸速率与土壤温度的关系,其决定系数 R<sup>2</sup> 大小排序为 CK(0.661)>70% A(0.6474)>100% A(0.6314)>Z(0.5181)>130% A(0.5179)。不同降水处理的土壤呼吸敏感性指数 Q<sub>10</sub> 大小顺序为 70% A(1.597),100% A(1.578),CK(1.465),Z(1.307),130% A(1.292),即零降水和过度增加降水均会降低土壤呼吸的温度敏感性,适当增加降水有助于提高土壤呼吸的温度敏感性。

(3)土壤呼吸速率与 10 cm 深度的土壤含水量的相关性随降水处理而变化,零降水处理中呈极显著正相关,对照处理则几乎不相关,增水 70%与增水 100%转为很低的负相关,增水 130%时则为显著负相关。

参考文献:

[1] Yu Z, Apps M J, Bhatti J S, et al. Implications of floristic and environmental variation for carbon cycle dynamics in boreal forest ecosystems of central Canada[J]. Journal of Vegetation Science, 2002, 13(3): 327-340.

[2] 方精云, 郭兆迪. 寻找失去的陆地碳汇[J]. 自然杂志, 2007, 29(1): 1-6.

[3] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y, et al. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: Moving beyond Q<sub>10</sub> [J]. Global Change Biology, 2006, 12(2): 154-164.

[4] Caprez R, Niklaus P A, Körner C. Forest soil respiration reflects plant productivity across a temperature gradient in the Alps[J]. Oecologia, 2012, 170(4): 1143-1154.

[5] 李玉强, 赵哈林, 赵学勇, 等. 土壤温度 and 水分对不同类型沙丘土壤呼吸的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 154-158.

[6] 王义东, 王辉民, 马泽清, 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.

[7] 任艳林, 杜恩在. 降水变化对樟子松人工林土壤呼吸速率及其表观温度敏感性 Q<sub>10</sub> 的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(6): 933-941.

[8] Fernandez D, Neff J C, Belnap J, et al. Soil respiration in the cold desert environment of the Colorado Plateau (USA): Abiotic regulators and thresholds[J]. Biogeo-

- chemistry, 2006, 78(3): 247-265.
- [9] Gaumontguay D, Black T A, Griffis T J, et al. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 140(1): 220-235.
- [10] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 97-103.
- [11] 王传宽, 杨金艳. 北方森林土壤呼吸和木质残体分解释放出的 CO<sub>2</sub> 通量[J]. 生态学报, 2005, 16(1): 49-53.
- [12] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO<sub>2</sub> flux in a Sonoran Desert ecosystem[J]. Global Change Biology, 2007, 13(2): 426-436.
- [13] Kim D, Vargas R, Bondlamberty B, et al. Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: A review of current literature and suggestions for future research [J]. Biogeosciences, 2012, 9(7): 2459-2483.
- [14] Escolar C, Maestre F T, Rey A, et al. Biocrusts modulate warming and rainfall exclusion effects on soil respiration in a semi-arid grassland[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 80(1): 9-17.
- [15] Aanderud Z T, Schoolmaster D R, Lennon J T, et al. Plants mediate the sensitivity of soil respiration to rainfall variability[J]. Ecosystems, 2011, 14(1): 156-167.
- [16] 董云社, 齐玉春, 刘纪远, 等. 不同降水强度 4 种草地群落土壤呼吸通量变化特征[J]. 科学通报, 2005, 50(5): 473-480.
- [17] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红等. 准噶尔盆地两种荒漠群落土壤呼吸速率对人工降水的响应[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2819-2826.
- [18] 吕文强, 王世杰, 刘秀明, 等. 喀斯特地区城市绿地土壤呼吸对降水变化的响应研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 174-180.
- [18] 冯华敏, 王玉杰, 王云琦, 等. 重庆市缙云山 3 种森林类型的土壤呼吸特征研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 38-44.
- [20] 于雷, 王玉杰, 王云琦, 等. 重庆缙云山针阔混交林地土壤呼吸速率及温度敏感性特征分析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(1): 57-63.
- [21] 赵冰清, 张会兰, 王玉杰, 等. 重庆缙云山环境因子对毛竹林土壤呼吸特征的作用[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 239-245.
- [22] 朱楠, 王彬, 王云琦, 等. 重庆缙云山 4 种典型林分生长季土壤呼吸特征及其与环境因子的关系[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(2): 16-23.
- [23] 刘春霞, 王玉杰, 王云琦, 等. 重庆缙云山 3 种林型土壤呼吸及其影响因子[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 587-593.
- [24] 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 等. 缙云山常绿阔叶林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应[J]. 林业科学, 2014, 50(1): 1-8.
- [25] 韩广轩, 周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望[J]. 植物生态学报, 2008, 33(1): 197-205.
- [26] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [27] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978.

(上接第 133 页)

- [20] 邓华平, 李树战, 何明山, 等. 豫南不同年龄杉木林生态系统碳储量及其空间动态特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(8): 83-90.
- [21] 叶镜中. 杉木萌芽更新[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, 31(2): 1-4.
- [22] 马祥庆, 刘爱琴, 何智英, 等. 杉木免耕萌芽更新生态效果研究[J]. 中南林学院学报, 2000, 20(1): 14-18.
- [23] 薛秀康, 童书振, 吴克选, 等. 江西乐安县杉木实生与多代萌芽林比较研究[J]. 林业科学, 1996, 32(3): 277-284.
- [24] 汪传佳. 杉木萌芽更新研究[J]. 林业科技开发, 2000, 14(2): 23-25.
- [25] 黄旺志, 郑芳, 李党法, 等. 豫南杉木萌芽林生长规律的研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2006, 19(2): 191-194.
- [26] 詹承雄. 杉木萌芽更新数量特征的初步研究[J]. 福建林学院学报, 2008, 28(3): 281-284.
- [27] 沈启昌. 杉木萌芽林与木荷混交效应试验[J]. 中南林业调查规划, 2006, 25(3): 57-59.
- [28] 邵可满, 汪长根. 杉木皆伐更新地山核桃与杉木萌芽林复合混交经营试验[J]. 江苏林业科技, 2003, 30(2): 37-38.
- [29] 汪炎明. 杉木萌芽林中套种刨花楠经营技术及生长效应[J]. 林业科技开发, 2009, 23(5): 119-121.
- [30] 刘正忠. 杉木萌芽纯林与混交林生长量及经济效益的研究[J]. 福建林业科技, 2003, 30(4): 49-51.
- [31] 巫基有. 枫香杉木(萌芽)混交造林观测分析[J]. 林业科技开发, 2002, 16(增刊): 84-85.