

文章编号: 1001-1498(2009)05-0722-06

土壤水分对土壤呼吸的影响

邓东周^{1,2}, 范志平^{1*}, 王红^{1,2}, 孙学凯¹,
高俊刚^{1,2}, 曾德慧¹, 张新厚^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所大青沟沙地生态实验站, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要环节,在维持全球碳平衡中发挥着十分重要的作用。全球气候变暖会改变大气环流和全球水文循环,进而导致全球的降水格局发生变化,其最直接的影响就是改变土壤的水分状况,关于土壤水分状况对土壤呼吸的影响机理的研究对于预测未来土壤碳储量变化具有重要意义。本文总结了国内外关于土壤水分对土壤呼吸的影响方面的研究,系统分析了土壤水分是怎样影响土壤呼吸的各组成部分的,并简单介绍了土壤水分对 Q_{10} 值的影响,最后针对当前相关研究存在的问题,对今后的研究方向加以展望。

关键词:土壤呼吸;土壤根呼吸;土壤微生物呼吸;土壤含水量; Q_{10} 值

中图分类号: Q142.3; S714

文献标识码: A

Influences of Soil Moisture on Soil Respiration

DENG Dong-zhou^{1,2}, FAN Zhi-ping¹, WANG Hong^{1,2}, SUN Xue-kai¹,
GAO Jun-gang^{1,2}, ZENG De-hui¹, ZHANG Xin-hou^{1,2}

(1. Daqinggou Ecological Station, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Soil respiration is an important component of the terrestrial ecosystems carbon cycle, and has great effects on maintaining the balance of global carbon. Global warming is expected to alter patterns of global atmosphere circulation and hydrologic cycling, and this will lead to the change of precipitation regimes on global to regional scales, which will have a direct effect on soil moisture, so it is necessary to study how the change of soil moisture would affect soil respiration for predicting change of soil carbon storage in the future. In this paper, the authors reviewed the studies about the influences of soil moisture change on soil respiration, then analyzed how the change of soil moisture would affect each component of soil respiration systemically, and introduced how the soil moisture would affect Q_{10} briefly, finally, it point out the study fields that should be emphasized in the future.

Key words: soil respiration; root respiration; microbial respiration; soil moisture; Q_{10}

全球变暖是目前人类面临的重大环境问题,大气 CO_2 浓度升高是导致全球变暖的主要原因之一^[1]。全球陆地土壤的有机碳库约为 1 500 Pg(C),

是陆地植被碳库 (500 ~ 600 Pg) 的 2 ~ 3 倍,是全球大气碳库 (750 Pg) 的 2 倍多^[2]。土壤呼吸是指土壤产生和向空气中释放 CO_2 的过程,包括 3 个生物学

收稿日期: 2009-01-20

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划 (2006BAC01A12)、沈阳市科学技术应用基础研究计划 (1063311-1-00)、“十一五”国家科技攻关 (BA517A02-1) 和内蒙古自治区“十一五”科技攻关项目资助

作者简介: 邓东周,男 (1982—),河南周口人,博士研究生,研究方向为降水量变化对陆地生态系统主要生态过程的影响。

* 通讯作者: fzp@iae.ac.cn

过程(根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸),以及一个非生物学过程(含碳矿物质的化学氧化作用)。每年土壤呼吸的碳释放量高达 80.4 Pg,相当于化石燃料燃烧释放的 CO_2 的 10 倍以上,是陆地上仅次于光合作用的第二大碳流通途径^[3]。由于土壤巨大的有机碳容量以及土壤呼吸的高 CO_2 释放量,土壤呼吸的细微变化都会显著影响到大气中的 CO_2 浓度,进而减缓或加剧全球温室效应,并对全球的碳循环和碳平衡产生影响。而且土壤呼吸是表征土壤质量和土壤肥力的重要生物学指标,是土壤中出现生命活动的标志之一,反映了土壤生物活性和物质代谢的强度。综上所述,土壤呼吸作为土壤碳库唯一的输出途径和大气 CO_2 的主要来源,是一个关系到全球气候变化、陆地生态系统碳循环和碳平衡、陆地生态系统的结构与功能的重要生态学过程。

全球变暖会改变全球的大气环流和水文循环,从而导致全球到地区范围内的降水格局变化,这是全球变化的一个重要方面^[4-5]。降水格局变化会直接改变土壤的水分状况,而土壤的水分条件是影响土壤呼吸的主要环境因子之一。在全球变化的背景下,了解土壤水分状况对土壤呼吸的影响机理,对于估计和预测未来全球变化的方向,理解陆地生态系统的碳汇碳源功能,以及对于帮助决策者从国家和社会层面采取稳定大气 CO_2 浓度的措施,都有很重要的理论和实践意义。由于土壤呼吸在全球变化与全球碳循环中的重要作用,目前已有许多关于其影响因子的研究,本文的目的就是综合以往国内外关于土壤水分状况这一环境因子对陆地生态系统土壤呼吸的影响的研究,系统化土壤水分对土壤呼吸的影响机理,提出这方面研究还存在的问题,并对以后的研究方向做出展望。

1 土壤水分对土壤呼吸的影响

对土壤水分和土壤呼吸的研究有很多,主要有实验室培养和野外原位观测两种途径。室内培养便于对其它环境因子进行控制,因此得到的结果比较一致,都表现为随着土壤含水量的增加,土壤呼吸速率增大^[6]。野外自然环境下,由于温度、降水、植被、土壤特性等环境因子在时间和空间上都有较大的异质性,导致不同研究区之间,以及同一研究区不同的研究期之间,土壤呼吸对土壤水分的响应结果不一。Davidson 等^[6]在 Amazon Basin 的放牧地和林地的研

究发现土壤呼吸随着土壤含水量的降低而降低,而 Oberbauer 等^[7]在北极冻原的研究表明随着土壤地下水位的下降,土壤呼吸逐渐增加。Reth 等^[8]认为土壤含水量只对草甸的土壤呼吸产生影响,而对裸地和林地则没有显著的影响。还有些研究表明在有些地区,土壤呼吸速率在夏季主要受土壤含水量控制,但冬季时尽管土壤含水量很高,土壤呼吸却很低^[9-10]。

综合以往研究结果可以得出,土壤水分状况对土壤呼吸的影响可分为三种情况:(1)当土壤含水量在田间持水量以下时,土壤呼吸速率随着土壤含水量的增加而增加^[11],而且增加速度很快,这是因为随着土壤含水量增加,新陈代谢所需要的激发能减少,土壤呼吸增加比较迅速^[12];(2)土壤含水量在一定的范围内(田间持水量和萎蔫系数之间)时,对土壤呼吸没有显著影响^[13];(3)当土壤含水量超过田间持水量的时候,土壤水分开始饱和,氧气向土壤中扩散受阻,根系和微生物呼吸受到抑制,土壤呼吸速率随着土壤含水量的增加而下降^[6,14]。

2 土壤水分影响土壤呼吸的途径

土壤呼吸以根系呼吸和微生物呼吸为主^[15-16],占土壤总呼吸的 90% 以上,土壤动物呼吸和含碳矿物质的氧化释放所占的比例很小^[17]。而植物根系和土壤微生物的生命活动都直接受土壤水分的控制,因此土壤水分主要通过影响根系呼吸和微生物呼吸来影响土壤呼吸。

2.1 土壤水分对根系呼吸的影响

根系呼吸是土壤总呼吸的主要组成成分,它在土壤总呼吸中所占的比例在不同地区及不同生态系统中相差很大(33%~60%)^[18-21],大约可以消耗掉光合固定碳的 8%~52%。对于根系呼吸占土壤总呼吸比例,一般来说高纬度地区高于低纬度地区^[20-21],森林高于草地,草地高于农田。根系呼吸所释放的能量主要分配给根系的生长、维持和根系对营养元素的吸收以及根系的共生和防卫。因此根系呼吸可以分为根生长呼吸、根维持呼吸和根离子吸收呼吸三个主要组成部分^[22-23]。

2.1.1 土壤水分对根的生长呼吸的影响 根的生长呼吸是指与根生物量的增加(即根的生长)相关的呼吸消耗和 CO_2 释放^[23]。土壤的水分状况必然影响植物根的生长与生存。一般含水量在小于最大田间持水量的情况下,根的生长随着土壤含水量的

增加而增加。周广胜等^[24]发现油蒿的根生物量随着施水量的增加而增加,认为根系生长与土壤水分间有显著的相关性;张喜旺^[25]通过对半干旱地区草原的降水量与地下根生物量的多年观察研究,也发现降水量与根系生物量呈显著正相关。

不同的生物环境条件下,水分对根生物量的影响不同,从而对根的呼吸的影响程度也不相同。有些研究发现适度的干旱可以通过促进根系的生长增加土壤的根系呼吸^[26-27],这是因为沙地上层土壤干旱,而下层含水量高,适度的干旱可以使植物把光合产物优先地输送到地下来增加地下的生物量^[27],从而扩大对水分的吸收面积,通过增加根的生物量而增加土壤释放的 CO_2 量;同时有些研究者认为在干旱的环境中,土壤水分会通过影响微生物的数量和活性以及控制土壤呼吸的其他因素,从而使观察到的土壤呼吸总量减少。另外,有很多研究者认为土壤呼吸速率与根的生物量正相关^[8, 19, 25, 28],但也有研究者持相反观点,认为根的生物量并不与土壤呼吸成因果关系,如 Tufekcioglu 等^[29]对 switchgrass 和 poplar cool-season grass 生态系统中的细根生物量和土壤呼吸进行比较研究,发现 switchgrass 生态系统中活的细根生物量虽然最高,但土壤呼吸量却最低,这可能是由根的周转速率和呼吸速率较低或凋落物的 C/N 较低造成的;而且不同直径的根,其呼吸速率也不相同,一般认为细根的呼吸速率大于粗根的呼吸速率^[30-32],因此如果水分增加导致粗根的生物量增加,而细根生物量下降,那么总的根呼吸速率也不会提高。

2.1.2 土壤水分对根的维持呼吸的影响 根的维持呼吸是指根系产生 CO_2 所释放的能量用于以下生物过程:(1)代谢过程中需要不断补充的物质(酶蛋白、核糖核酸、膜脂等)的再合成;(2)离子和代谢物浓度梯度的维持;(3)在变化的环境或逆境中与生理适应相关的过程^[23]。Huang 等^[22]对葡萄 (*Vitis* sp.) 根系呼吸的研究表明,随着干旱的加剧,根系从细根到粗根逐级死亡,根呼吸的降低不仅仅只是由于根系生长和离子吸收的减少,也包括与蛋白质退化、膜势降低等有关的根系维持消耗的降低,当根系死亡时,用于维持的消耗随之也消失,根的呼吸也随之停止。

2.1.3 土壤水分对根离子吸收呼吸的影响 土壤中的营养元素如 N、P、K、Mg、Fe、Ca 等是植物生长发育所必须的,根系呼吸释放的大部分能量用于对

此类营养元素的吸收和运移,根用于离子吸收的呼吸占根系总呼吸的 13% ~ 60%^[23]。土壤水分状况会影响植物对营养元素的吸收量,从而影响根的呼吸速率^[22]。干旱条件下,水分的不足限制了根系的生长及根对离子的吸收,并减少了根系用于维持的能量消耗,从而减少了对呼吸释放的能量的需求,进而导致土壤呼吸速率的下降^[22]。

根表面的物质通道主要是活性基团,它们的作用是与营养物质作用将其运输到根部,这些结合物质的基团所占有的面积可称为活跃吸收面积。土壤的水分状况通过影响根系对营养物质的活跃吸收面积来影响根离子吸收呼吸,这种影响在植物的不同物候期存在差异。韩希英等^[33]发现在干旱胁迫下,拔节期和抽雄-开花期的玉米 (*Zea mays* L.) 根系活跃吸收面积降低,宋凤斌等^[27]对玉米的干旱胁迫试验结果表明,在玉米苗期,根的活跃吸收面积均有所增加,进入旺盛生长期后,干旱胁迫对根系有明显的抑制,根系活跃吸收面积降低。

土壤的水分状况还会影响土壤中各种营养元素的可利用性和可移动性。干旱的土壤中,其营养元素移动性差,可利用性低,从而限制了根的吸收。如韩希英^[33]的研究发现,土壤含水量的减少降低了 P 的扩散能力和 K 的活化程度,从而使根对 P、K 的吸收受到抑制。

2.2 土壤水分对微生物呼吸的影响

微生物呼吸是土壤呼吸的重要组成部分,不同生态系统其在土壤总呼吸中所占比例相差较大,约为 30% ~ 90%。土壤水分是土壤中可溶性有机质有效性和可移动性的主要控制因子^[34],而可溶性有机质是土壤微生物主要的呼吸底物和能量来源^[35],因此土壤水分状况的变化会对土壤的微生物呼吸产生深刻影响。Borken 等^[36]研究表明,土壤微生物对土壤有机质的分解常常受到夏季较低的含水量的限制,降水发生后,可溶性有机质的有效性和可移动性增加,从而增加了土壤中微生物的数量和活性,导致 CO_2 释放量在降水后有一个瞬时的峰值。另外,土壤微生物量的增加使土壤中有机质分解速率提高,从而促进了土壤有机物中无机营养元素的释放,有利于根的吸收和同化,进而影响到根系呼吸。

在干旱环境中,微生物的数量将随着土壤含水量的增加而增加。Rosacker 等^[37]对季节间微生物数量的研究发现,微生物数量随着雨季的开始而增加,又随着接下来干旱的发生而降低。Scott-Denton

等^[38]对土壤根际呼吸和异养呼吸的研究结果表明,2002年的秋季干旱抑制了微生物数量的增长,在2003年春季积雪融化,土壤含水量升高,微生物量出现了快速增长,但随着土壤水分的饱和,微生物数量又出现了迅速的下降。王义祥等^[39]对不同干旱胁迫下土壤中微生物的研究表明,红壤中轻度干旱情况下微生物的数量最多,微生物数量随着干旱胁迫程度的增加而减小。

土壤水分影响着土壤微生物的各种生命活动,在土壤含水量较高或较低条件下土壤微生物的活性都会受到抑制。在干旱环境中,土壤微生物会因缺少水分而处于休眠状态,活性降低^[34,40],当干旱严重时甚至出现死亡;在土壤含水量过大的环境中,土壤中的孔隙被水填满,不利于空气中氧气向土壤中扩散,减少了土壤中的 O_2 含量,导致土壤微生物活性受到抑制^[41]。Cook等^[42]的研究表明,不同的水势条件下,土壤中微生物的活性不同,高的水势条件下细菌活性较高,而相对低的水势条件下真菌,放线菌的活性较高。

3 土壤水分对 Q_{10} 值的影响

全球变暖是目前人类面临的重大环境问题,据 IPCC 预测,2100 年地球表面温度将平均升高 1.4 ~ 5.8^[43],土壤呼吸对全球变暖会如何响应已经成为人们关注的热点。土壤呼吸对温度变化相当敏感,通常用 Q_{10} 值来反映土壤呼吸的温度敏感性^[44]。 Q_{10} 值表示温度每升高 10 度,土壤呼吸速率增加的倍数^[45-46]。从区域到全球尺度,很多生态系统模型用 Q_{10} 函数来估算温度对土壤呼吸影响的量, Q_{10} 与土壤呼吸成非线性关系,模型中 Q_{10} 的较小偏差会对土壤呼吸的估算和预测产生较大误差。

许多研究表明,土壤水分条件对 Q_{10} 有显著影响,但不同的研究者在不同的研究地区得出的结果表明不同的生态系统中其对 Q_{10} 的影响方向和程度有很大不同。有的研究表明,土壤呼吸的温度敏感性随着土壤含水量的升高而增强,如 Smith^[47] 对南极洲附近的 Marion 岛屿 5 种生境的土壤进行室内培养,发现当温度在 5 ~ 20 之间,水分在 20% ~ 100% 田间持水量之间时,土壤异养呼吸的 Q_{10} 与土壤水分成正相关;Gulledge 和 Schimel^[48] 通过对北美泰加林的研究发现湿润年份的 Q_{10} 总是高于干旱年份。有的研究却发现土壤含水量的升高会降低土壤呼吸的温度敏感性,如 Luo 等^[49] 在美国俄克拉荷马

州的大草原的研究表明土壤呼吸的温度敏感性在温度升高的情况下出现下降的趋势,或适应的现象,而且随着温度的升高,适应现象越来越明显。也有的研究发现土壤水分跟土壤呼吸间不存在明显关系^[44]。

4 问题与展望

目前,虽然对水分和土壤呼吸的研究很多,但由于水分对土壤呼吸影响相当复杂,既可以直接影响根和微生物的呼吸,也可以通过影响土壤物理特性等其他环境因子间接影响土壤呼吸速率,因此在不同的生态系统,以及同一生态系统不同时期土壤呼吸对土壤水分的响应程度和响应机理是不同的,在某个地区或时期二者可能不相关或相关性较差^[8,18,29],而在另一个地区或另一个时期则可能出现极显著的相关性^[6,10,28],所以很难在水分和土壤呼吸之间建立一个高普适性的定量化模型。由于根系呼吸和微生物呼吸在不扰动土壤的情况下很难区分开来,目前国内外关于土壤水分分别影响根呼吸和微生物呼吸的研究还很少,因此观察到的不同土壤水分状况下的土壤呼吸的变化可能会掩盖根呼吸和微生物呼吸变化之间的区别,而二者对土壤水分状况的依赖性及其敏感程度是不一样的。已有研究表明土壤呼吸对温度的长期变化具有一定适应性^[46],而目前对土壤中根系和微生物呼吸对全球降水变化导致的土壤水分变化的适应机理还不清楚,很难判断土壤呼吸在对水分格局变化适应后的变化趋势。针对以上存在的问题,关于土壤水分对土壤呼吸的影响的研究,今后的研究方向应考虑以下三点:

(1) 多因子控制实验,研究温度、植被、土壤特性等环境因子与土壤呼吸的水分敏感性的关系,以及不同影响因子间的交互作用。

(2) 根系呼吸和微生物呼吸对土壤水分的敏感性可能不同,区分土壤水分对根系呼吸和微生物呼吸不同影响,对于加深理解土壤水分对土壤呼吸影响的机理有很重要的意义。

(3) 进行土壤水分对土壤呼吸影响的长期原位观测研究,揭示土壤中根系和微生物呼吸对未来可能出现的降水变化格局的响应和适应机理,更准确地预测未来全球降水变化环境下可能引起的土壤碳储量变化。

参考文献:

- [1] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al* Carbon pool and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263: 185 - 190
- [2] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil [J]. *Nature*, 1990, 348: 232 - 234
- [3] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 23 - 36
- [4] Oreskes N. The scientific consensus on climate change [J]. *Science*, 2004, 306: 1686
- [5] Mahman J D. Uncertainties in projections of human-caused climate warming [J]. *Science*, 1997, 278: 1416 - 1417
- [6] Davidson E A, Verchot L V, Cattalini 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
- [7] Oberbauer S F, Gillepie C T, Cheng W, *et al* Environmental effects on CO₂ efflux from riparian tundra in the northern foothills of the Brooks Range, Alaska, USA [J]. *Oecologia*, 1992, 92: 568 - 577
- [8] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux-A modified model [J]. *Plant and Soil*, 2005, 268: 21 - 23
- [9] Fernandez D P, Neff J C, Belna P J, *et al* Soil respiration in the cold desert environment of the Colorado Plateau (USA): abiotic regulators and thresholds [J]. *Biogeochemistry*, 2006, 78: 247 - 265
- [10] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest [J]. *Plant and Soil*, 1997, 190: 127 - 141
- [11] Lavigne M B, Foster R J, Goodine G. Seasonal and annual changes in soil respiration in relation to soil temperature, water potential and trenching [J]. *Tree Physiology*, 2004, 24: 415 - 424
- [12] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217 - 227
- [13] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系 [J]. *生态学报*, 2004, 24 (4): 831 - 836
- [14] Reichstein M, Rey A, Freibauer A, *et al* Modeling temporal and large-scale variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17 (4): 1104
- [15] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, 44 (B): 81 - 99
- [16] 刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸 [J]. *植物生态学报*, 1998, 22 (2): 119 - 126
- [17] 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 等. 土壤微生物与根系呼吸作用影响因子分析 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16 (8): 1547 - 1552
- [18] Ohashi M, Gyokusen K, Saito A. Contribution of root respiration to total soil respiration in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) artificial forest [J]. *Ecological Research*, 2000, 15: 323 - 333
- [19] 杨玉盛, 陈光水, 董彬, 等. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应 [J]. *生态学报*, 2004, 24 (5): 953 - 958
- [20] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 林木根呼吸及测定方法进展 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28 (3): 426 - 434
- [21] 侯琳, 雷瑞德, 王得祥, 等. 森林生态系统土壤呼吸研究进展 [J]. *土壤通报*, 2006, 37 (3): 589 - 594
- [22] Xuming H, Lakso A N, Eissenstat. Interactive effects of soil temperature and moisture on Concord grape root respiration [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56: 2651 - 2660
- [23] Amthor J S. The role of maintenance respiration in plant growth [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1984, 7: 561 - 569
- [24] 周广胜, 王玉辉. 全球生态学 [M]. 北京: 气象出版社, 2003
- [25] 张喜旺. 宁南山区干草原地下生物量与降水量的相关分析 [J]. *环境保护与治理*, 2002 (9): 44 - 45
- [26] 郭建平, 高素华. 沙地植物生长对 CO₂ 增加和土壤干旱的响应 [J]. *水土保持学报*, 2004, 18 (4): 174 - 176
- [27] 宋凤斌, 戴俊英. 玉米茎叶和根系的生长对干旱胁迫的反应和适应性 [J]. *干旱区研究*, 2005, 22 (2): 256 - 258
- [28] 张宪权, 王文杰, 祖元刚, 等. 东北地区几种不同林分土壤呼吸组分的差异性的研究 [J]. *东北林业大学学报*, 2005, 33 (2): 46 - 73
- [29] Tufekcioglu A, Raich J W, Isenhardt T M, *et al* Soil respiration within riparian buffers and adjacent crop fields [J]. *Plant and Soil*, 2001, 229: 117 - 124
- [30] Rakonczay Z, Seiler J R, Kelting D L. Carbon efflux rates of fine root of three tree species decline shortly after excision [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1997, 38 (3): 243 - 249
- [31] Pregitzer K S, Laskowski M J, Burton A J, *et al* Variation in sugar maple root respiration with root diameter and soil depth [J]. *Tree Physiology*, 1998, 18 (10): 665 - 670
- [32] 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: 473 - 480
- [33] 韩希英, 宋凤斌. 干旱胁迫对玉米根系生长及根际养分的影响 [J]. *水土保持学报*, 2006, 20 (3): 170 - 172
- [34] Casals P, Romano J, Cortina J, *et al* CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 261 - 281
- [35] 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: 972 - 978
- [36] Borken W, Davidson E A, Savage A K, *et al* Determination of drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizon using DC half-bridge sensors [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67: 1888 - 1896
- [37] Rosacker L L, Kieff T L. Biomass and adenylate energy charge of a grassland soil during drying [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22: 1121 - 1127
- [38] Scott-Denton L E, Rosentiel T N, Monson R K. Differential controls by climate and substrate over the heterotrophic and rhizospheric components of soil respiration [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 205 - 216
- [39] 王义祥, 任丽花, 翁伯琦, 等. 土壤干旱胁迫对圆叶决明土壤微

- 生物的生态效应 [J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2005, 44 (6): 66 - 68
- [40] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, *et al* Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 64: 613 - 623
- [41] Merilap P, Ohtonen R. Soil microbial activity in the coastal Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) forests of the Gulf of Bothnia in relation to humus-layer quality, moisture and soil types [J]. *Biology and Fertility Soils*, 1997, 25: 361 - 365
- [42] Cook R J, Papendick R. Soil water potential as a factor in the ecology of *Fusarium roseum* f. sp. *Ceelis Culmorum* [J]. *Plant and Soil*, 1970, 32: 131 - 145
- [43] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, *et al* Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Cambridge University Press, 2001: 1 - 896
- [44] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 155 - 165
- [45] Fang C, Smith P, Moncrieff J B, *et al* Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature [J]. *Nature*, 2005, 433: 57 - 59
- [46] Winkler J P, Cherry R S, Schlesinger W H. The Q₁₀ relationship of microbial respiration in a temperate forest soil [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(8): 1067 - 1072
- [47] Smith V R. Soil respiration and its determinants on a sub-Antarctic island [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35: 77 - 91
- [48] Gulledge J, Schimel J P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of Taiga Forest stands in Interior Alaska [J]. *Ecosystems*, 2003, 3: 269 - 282
- [49] Yiqi L, Shiqiang W, Dafang H, *et al* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, 413: 622 - 625

欢迎订阅 2010年《林业调查规划》

《林业调查规划》1976年创刊,是由云南省林业调查规划和西南地区林业信息中心共同主办的国内外公开发行的林业科技刊物。被全国多家期刊数据库收录。为中国科技核心期刊、中国林业核心期刊、首届《CAJ-CD规范》执行优秀期刊。本刊开辟了森林经理、“3S”技术、森林资源管理、生物多样性保护、生态建设、自然保护区建设、森林保护、林火研究、营造林技术、生态旅游、林产业开发、专家论坛等栏目。本刊以技术性、实用性、创新性为原则,具有较强的指导性、知识性和可读性,是广大从事林业生产、科研、教学的科技工作者和领导不可或缺的参考资料。

本刊为双月刊, A4开本,逢单月底出刊。国际刊号 ISSN 1671 - 3168,国内统一刊号 CN 53 - 1172/S, 2010年每期 130页码,每期定价 10元,全年 60元;增刊 2册,全年 40元;共计 100元。由编辑部自办发行,即日起,欢迎社会各界订阅,订阅单位或个人可通过邮局或银行汇款。欢迎广大林业科技人员踊跃投稿,展示自己才华,也欢迎社会各界刊登广告、展示形象。

邮局汇款地址:云南省昆明市盘龙区人民东路 289号

云南省林业调查规划院《林业调查规划》编辑部

联系及收款人:邓 砚

邮 编: 650051

开户银行:昆明市农行双龙支行

账 号: 219201040001993

银行户名:云南省林业调查规划院

电 话: (0871) 3318347; 3332538

传 真: (0871) 3318347

E-mail: ynfip@vip.163.com

http://lydcgh.periodicals.net.cn/