

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 20 期 Vol.32 No.20 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 20 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

太湖流域源头溪流氧化亚氮(N_2O)释放特征.....	袁淑方, 王为东 (6279)
闽江河口湿地植物枯落物立枯和倒伏分解主要元素动态.....	曾从盛, 张林海, 王天鹅, 等 (6289)
宁夏荒漠草原小叶锦鸡儿可培养内生细菌多样性及其分布特征.....	代金霞, 王玉炯 (6300)
陕西省栎黄枯叶蛾蛹的空间分布.....	章一巧, 宗世祥, 刘永华, 等 (6308)
模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响.....	张中峰, 尤业明, 黄玉清, 等 (6318)
中国井冈山生态系统多样性.....	陈宝明, 林真光, 李 贞, 等 (6326)
鄂西南木林子常绿落叶阔叶混交林恢复过程中优势树种生态位动态.....	汤景明, 艾训儒, 易咏梅, 等 (6334)
不同增温处理对夏蜡梅光合特性和叶绿素荧光参数的影响	徐兴利, 金则新, 何维明, 等 (6343)
模拟长期大风对木本猪毛菜表观特征的影响	南 江, 赵晓英, 余保峰 (6354)
雷竹林土壤和叶片 N、P 化学计量特征对林地覆盖的响应	郭子武, 陈双林, 杨清平, 等 (6361)
利用树木年轮重建赣南地区 1890 年以来 2—3 月份温度的变化	曹受金, 曹福祥, 项文化 (6369)
川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态.....	胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等 (6376)
火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响	周文昌, 牟长城, 刘 夏, 等 (6387)
黄土丘陵区三种典型退耕还林地土壤固碳效应差异.....	佟小刚, 韩新辉, 吴发启, 等 (6396)
岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性	潘树林, 辜 彬, 李家祥 (6404)
坡位对东灵山辽东栎林土壤微生物量的影响.....	张 地, 张育新, 曲来叶, 等 (6412)
太湖流域典型入湖港口景观格局对河流水质的影响.....	王 瑛, 张建锋, 陈光才, 等 (6422)
基于多角度基尼系数的江西省资源环境公平性研究	黄和平 (6431)
中国土地利用空间格局动态变化模拟——以规划情景为例	孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟 (6440)
世界主要国家耕地动态变化及其影响因素	赵文武 (6452)
不同氮源下好氧反硝化菌 <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 的脱氮特性	肖继波, 江惠霞, 褚淑祎 (6463)
基于生态足迹方法的南京可持续发展研究.....	周 静, 管卫华 (6471)
基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究.....	蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等 (6481)
浦江县土壤碱解氮的空间变异与农户 N 投入的关联分析	方 斌, 吴金凤, 倪绍祥 (6489)
长江河口潮间带盐沼植被分布区及邻近光滩鱼类组成特征	童春富 (6501)
深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的比较研究.....	周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等 (6511)
灰斑古毒蛾口腔反吐物诱导沙冬青细胞 Ca^{2+} 内流及 H_2O_2 积累	高海波, 张淑静, 沈应柏 (6520)
濒危物种金斑喙凤蝶的行为特征及其对生境的适应性.....	曾菊平, 周善义, 丁 健, 等 (6527)
细叶榕榕小蜂群落结构及动态变化.....	吴文珊, 张彦杰, 李凤玉, 等 (6535)
专论与综述	
流域生态系统补偿机制研究进展	张志强, 程 莉, 尚海洋, 等 (6543)
可持续消费的内涵及研究进展——产业生态学视角	刘晶茹, 刘瑞权, 姚 亮 (6553)
工业水足迹评价与应用.....	贾 佳, 严 岩, 王辰星, 等 (6558)
矿区生态风险评价研究述评.....	潘雅婧, 王仰麟, 彭 建, 等 (6566)
研究简报	
围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态.....	李学斌, 陈 林, 张硕新, 等 (6575)
密度和种植方式对夏玉米酶活性和产量的影响.....	李洪岐, 蔺海明, 梁书荣, 等 (6584)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 312 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10	

封面图说: 草丛中的朱鹮——朱鹮有着鸟中“东方宝石”之称。洁白的羽毛, 艳红的头冠和黑色的长嘴, 加上细长的双脚, 朱鹮历来被日本皇室视为圣鸟。20 世纪前朱鹮在中国东部、日本、俄罗斯、朝鲜等地曾有较广泛地分布, 由于环境恶化等因素导致种群数量急剧下降, 至 20 世纪 70 年代野外已认为无踪影。1981 年 5 月, 中国鸟类学家经多年考察, 在陕西省洋县重新发现朱鹮种群, 一共只有 7 只, 也是世界上仅存的种群。此后对朱鹮的保护和科学研究做了大量工作, 并于 1989 年在世界首次人工孵化成功。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201205030634

胡宗达, 刘世荣, 史作民, 刘兴良, 何飞. 川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态. 生态学报, 2012, 32(20): 6376-6386.

Hu Z D, Liu S R, Shi Z M, Liu X L, He F. Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in western Sichuan Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6376-6386.

川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态

胡宗达^{1,2,3}, 刘世荣^{1,2,*}, 史作民¹, 刘兴良⁴, 何 飞⁴

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

3. 四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; 4. 四川省林业科学研究院, 成都 610081)

摘要: 采用 LI-8100A 土壤碳通量自动测量系统, 于 2011 年 4—11 月对川西亚高山草甸的土壤呼吸进行了测定, 分析了水热因子对草甸昼、夜间土壤呼吸特征及其季节动态变化的影响。结果表明: 1) 川西亚高山草甸昼、夜间土壤呼吸的变化格局不同, 昼间呈双峰型, 夜间呈抛物线型; 整个观测期(4—11 月)内, 夜间土壤呼吸占总土壤呼吸的 46.79%, 其中草盛期(6—9 月)的昼、夜土壤呼吸占有较大比例。2) 8 次夜间土壤呼吸测定的变化趋势基本相同, 最低值均在 06:30—07:00 左右; 昼、夜间土壤呼吸季节变化的主要影响因素为土壤 5 cm 温度, Van't Hoff 指数模型和 Lloyd 和 Taylor 方程均适合预测整个的土壤呼吸通量。3) 返青期(4—5 月)和枯黄期(10—11 月)的昼、夜间土壤呼吸差异不显著, 均低于草盛期; 整个观测期, 草甸昼、夜间土壤呼吸与土壤温度均有显著的指数相关, 而与土壤水分含量存在显著线性相关则表现在草返青期夜间及枯黄期昼、夜间。4) 整个观测期昼、夜间的 Q_{10} 值分别为 3.90 和 3.74; 对 Q_{10} 值的分析表明, 返青期昼土壤呼吸的 Q_{10} 值最大(4.14), 草盛期夜间的 Q_{10} 值最小(1.40)。研究结果说明, 采用昼、夜间土壤呼吸的瞬时值来推算土壤呼吸的季节通量和年通量时, 不仅需要加大观测期间夜间土壤呼吸的测定, 还需要考虑昼、夜间土壤温度和土壤含水量及其它生物因子的影响。

关键词: 夜间土壤呼吸; 土壤温度; 土壤水分; 亚高山草甸; Q_{10} 值

Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in western Sichuan Province, China

HU Zongda^{1,2,3}, LIU Shirong^{1,2,*}, SHI Zuomin¹, LIU Xingliang⁴, HE Fei⁴

1 The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Beijing, 100091, China

2 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, China's State Forestry Administration, Beijing 100091, China

3 College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China

4 Sichuan Academy of Forestry, Chengdu, 610081, Sichuan, China

Abstract: Both soil temperature and soil water condition are important factors that influencing soil respiration at different temporal scales. There is still intra and inter-seasonal variations in soil temperature and soil water content although they are seasonally correlated. In this study, a field experiment was carried out to explore effects of diurnal variations in soil temperature and soil water on soil respirations (R_s) in the alpine meadows in Balang Mountain in West Sichuan of China. The objectives of our study are to: 1) understand the seasonal pattern of day- and night-time R_s , in particular, nocturnal variations of R_s , 2) elucidate the partitioning pattern of day- and night-time R_s , and 3) compare Q_{10} values of day- and night-time R_s . We examined both day- and night-time R_s by using LI-8100 Automated Soil CO₂ Flux System on monthly

基金项目: 林业公益性行业科研重大专项(200804001)

收稿日期: 2012-05-03; 修订日期: 2012-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Liusr@caf.ac.cn

basis from April to November, 2011. The effects of soil temperature and soil water on R_s of alpine meadow were analyzed based on field measurements of diurnal soil respiration. The results indicated that R_s showed large seasonal variations in day- and night-time during the measurements period, with a two-peak curve in the day-time and parabola curve at the night-time. During the measurements period (April to November), the means of R_s in the day- and night-time are $1.83 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $1.61 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. The means of daytime and nighttime R_s were significantly higher in growing seasons (Jun to September) than that in green up period (April to May) and withering period (October to November) which accounted largest contribution to annual soil respiration. The nocturnal soil respiration appeared to have similar tendency of variations among measurements, and it was relatively low at night-time, with the lowest between 06:30 and 07:00am. During the measurement period, Van't Hoff equation and Lloyd & Taylor function were the same to be used for describing the relationships between soil respiration and soil temperature. The two-factor equations (soil temperature and moisture content) were much better to describe responses of nocturnal soil respiration compared to the single-factor equations. Soil respiration rates in the day-time and night-time exhibited a significantly exponential correlation with soil temperature during green up period, growing season and weathering periods, while the linear positive relationships between soil respiration and soil water content were found for nocturnal respiration in green up period and for both day-time and nocturnal respirations in weathering period. Q_{10} values were estimated to be 3.90 and 3.74 for the day-time and night-time respirations respectively, during the whole measurement period. Soil Q_{10} values varied with season, but daytime soil respiration during the green up period was most sensitive to temperature, and the nocturnal soil respiration during the peak months of growing seasons was least sensitive to temperature. Our results demonstrated that soil temperature, soil water, and their interactive effects had distinct effects on soil respiration of either the day-time or night-time during the measurements period in the subalpine meadow. Therefore, more measurements of the soil nocturnal CO_2 efflux are essential to accurately estimate the seasonal and annual carbon fluxes based on instantaneous measurements of soil respiration. At the same time, soil temperature, soil water and other biotic factors affecting soil respiration should be taken into account.

Key Words: nocturnal soil respiration; soil temperature; soil water; alpine meadow; Q_{10} value

全球土壤是一个巨大的碳库,其碳储量达 1395—2011 Pg C,约为大气碳储量的 3 倍^[1]。土壤呼吸在土壤碳库和大气碳库的动态变化中起着关键作用。土壤呼吸每年对大气贡献约 50—75 Pg C,其含量等于或者超过全球陆地生态系统的净初级生产力^[2],是化石燃料燃烧释放 CO_2 含量的 10 余倍^[3-4]。全球尺度上,温度每升高 1 $^{\circ}\text{C}$,土壤将分解释放以 1.1×10^{10} — 3.4×10^{10} t 碳计的 CO_2 到大气中^[5]。因此,土壤呼吸很小的变化都会引起大气 CO_2 浓度的很大改变,导致全球气候变化加剧或减缓。

中国草地面积占世界草地面积的 6%—8%,储存的有机碳储量为世界草地的 9%—16%,而亚高山草甸占中国草地有机碳储量的 25.6%^[6],可见亚高山草甸在全球碳循环中的地位。所以,深入了解亚高山草甸的土壤呼吸作用及其影响因子是草地碳循环研究的关键科学问题之一。国内外学者已经针对草甸土壤呼吸与环境因子的关系、土壤呼吸量估算、放牧强度对土壤呼吸的影响以及土壤呼吸对全球变化的响应等方面开展了研究,涉及高寒草甸^[7-10]、高原草甸^[11]、科尔沁草甸^[12]、亚高山草甸^[13-16]以及高山草甸^[17-18]等类型。研究显示,温度和水分是影响土壤呼吸的主要环境因子,但他们与土壤呼吸的关系表征不一。Wang 等和常宗强等在亚高山草甸观察到土壤呼吸与土壤温度和土壤含水量均呈现显著相关关系^[19-20];王明君等研究发现土壤呼吸速率与土壤温度并没有显著的相关性^[11];Lin 等对西藏亚高山草甸的研究表明,年际间土壤呼吸的变化主要受控于降水量,而生长季节的土壤呼吸与土壤温度正相关,与土壤湿度负相关^[13],而 Li 等的研究发现土壤呼吸的季节变化主要受控于土壤温度^[21]。目前,川西亚高山草甸的昼、夜间土壤呼吸与土壤温和土壤含水量的关系研究甚少。因此,开展川西亚高山草甸不同时间尺度土壤呼吸动态变化的研究,有助于加深人们对亚高山草甸的土壤呼吸变化机理及其对温度敏感性的了解,也有利于提高草甸土壤碳排放估算的精度。本

研究以川西天然亚高山天然草甸为对象,在野外连续定位测定草甸不同发育期昼、夜间的土壤呼吸速率及相应的土壤温度和土壤含水量。本研究的主要目标是:(1) 阐明草甸昼、夜间土壤呼吸的关键控制因子和变化机制;(2) 明晰昼、夜间土壤呼吸在亚高山草甸碳排放过程中的贡献率;(3) 昼、夜间土壤呼吸温度敏感性的变化规律。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于卧龙自然保护区内的皮条河上游巴郎山东南坡的天然亚高山草甸(30°53′02.2″ N, 102°57′55.5″ E, 海拔 3600 m, 坡度≥46°),属青藏高原气候带。在海拔 2700 m 地带,年平均气温 8.4 °C,1 月平均气温-1.7 °C,7 月平均气温 17.0 °C,活动积温 4000 °C (≥0 °C),年平均降水量 700.0—900.0 mm,主要集中在 5—9 月,占全年降水量的 68.1%,年平均相对湿度为 80%。土壤类型为亚高山草甸土。草甸植物群落以锡金鳞毛蕨(*Dryopteris sikkimensis* (Hook.) O. Ktze)、秦艽(*Gentiana macrophylla* Pall)为优势种,零星分布有突隔梅花草(*Parnassia delavayi* Franch)、四川马先蒿(*Pedicularis szetschuanica* Maxim)、大卫氏马先蒿(*Pedicularis davidii* Franch)、宝兴棱子芹(*Pleurospermum davidii* Franch)等,草甸生长旺季(7—9 月)植物株的平均高度为 67 cm,覆盖度为 91%。

1.2 研究方法

在样地中选取空间异质性较小,尽量没有人为及动物干扰的地段,随机布设 12 个 1 m×1 m 的样方,在每一样方中心设置 1 个 PVC 环(内径 20 cm、高 8 cm,其中 5 cm 埋于地下)。PVC 环在整个观测过程中固定位置,确保连续定位的观测。

2011 年 4—11 月,采用便携式土壤碳通量测量系统 LI-8100(LI-COR, Lincoln, USA)测量土壤呼吸(R_s),同时通过土壤呼吸测定仪附带的温度探针和水分含量(MI2x)探头同步测定土壤 5 cm 深处的温度及土壤水分含量。测定前一天,在尽量不扰动 PVC 环中土壤情况下,小心地沿地面剪去 PVC 环内的植物,清除地表凋落物等杂物。每月上旬测量一次,测量时,尽量选取晴朗天气进行观测。昼间测量时间为 09:00—11:00^[1, 19, 22];夜间测量按照气象学中纬度在 30°附近的日照时间季节变化确定测量时间,4—5 月测量时间为 18:30—08:00,6—8 月为 20:00—07:00,9—11 月为 19:00—07:30,每半小时测定一次土壤呼吸^[23]。

1.3 数据分析方法

采用 Van't Hoff 模型、Lloyd 和 Taylor 方程来表示土壤呼吸与温度之间的关系^[24-25],用线性模型解释土壤呼吸与土壤含水量以及土壤温度和土壤含水量的关系^[25]。

$$R_s = \alpha e^{bT}, Q_{10} = e^{10b} \quad (1)$$

$$R_s = R_{ref} e^{[E_0(\frac{1}{56.02} - \frac{1}{T+46.02})]} \quad (2)$$

$$R_s = \alpha + bSWC \quad R_s = \alpha + bT + cSWC \quad (3)$$

式中, R_s 为土壤呼吸($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), α 、 b 、 c 分别为拟合参数, T 、 SWC 为地下 5cm 土壤温度(°C)和土壤含水量(%), Q_{10} 为温度敏感系数, R_{ref} 为温度为 10°C 的土壤呼吸呼吸速率, E_0 (K)为活化能,是表征土壤呼吸温度敏感性的指数参数。

以整个观测期测定的土壤呼吸速率为因变量,温度、水分为自变量构建回归模型,通过模型以半小时为步长进行梯形积分求得当年土壤呼吸的年通量^[26]。

所有数据统计分析在 SPSS 17.0 软件中完成。用 One-way ANOVA 检验昼夜间土壤呼吸季节变化的显著性。所有统计的显著性水平均为 0.05。图形采用 SigmaPlot 10.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 亚高山草甸土壤呼吸、土壤温度和土壤含水量的夜间变化

研究表明,夜间土壤呼吸均值的变幅为(0.69±0.13) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和(1.97±0.09) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。整个观

测期(4—11月)的夜间土壤呼吸,最小值为 $0.45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,最大值为 $2.32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,平均为 $1.61 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。土壤呼吸在夜间随温度的降低呈波动缓慢下降态势,没有出现明显的波峰和波谷。6月至9月的波动幅度较其它月份高(图1)。夜间土壤呼吸在00:30—01:30后降到均值以下,最小值在4—5月和10—11月都出现在06:30前后;6—9月出现在07:00左右。夜间土壤呼吸最大值与最小值极差呈现波动变化。

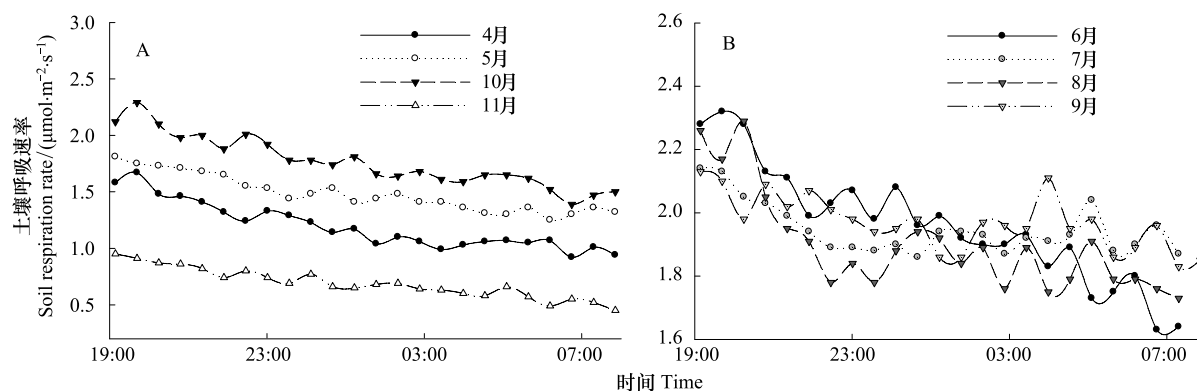


图1 土壤呼吸的夜间变化

Fig.1 Nocturnal variations in soil respiration rates in the alpine meadow

从图2可看出,整个观测期的夜间5 cm土壤平均温度变幅(4.02 ± 1.16) $^{\circ}\text{C}$ —(11.6 ± 0.93) $^{\circ}\text{C}$,瞬时温度变幅 2.71 — 13.52 $^{\circ}\text{C}$ 。土壤温度极差(最高土壤温度与最低土壤温度的差值)达 3 $^{\circ}\text{C}$ 以上的分别是 4.97 $^{\circ}\text{C}$ (4月)、 3.27 $^{\circ}\text{C}$ (10月)、 3.98 $^{\circ}\text{C}$ (11月),5月—9月的温度极差均在 3 $^{\circ}\text{C}$ 以下。各观测日土壤5 cm的最低温度在4—5月和10—11月都出现08:00前后;6—9月则出现在07:00左右;整个观测期,夜间5 cm土壤含水量变化平缓(图2B),其均值为(46.06 ± 2.65)%,变幅为(40.84 ± 0.07)%—(49.23 ± 0.10)%。

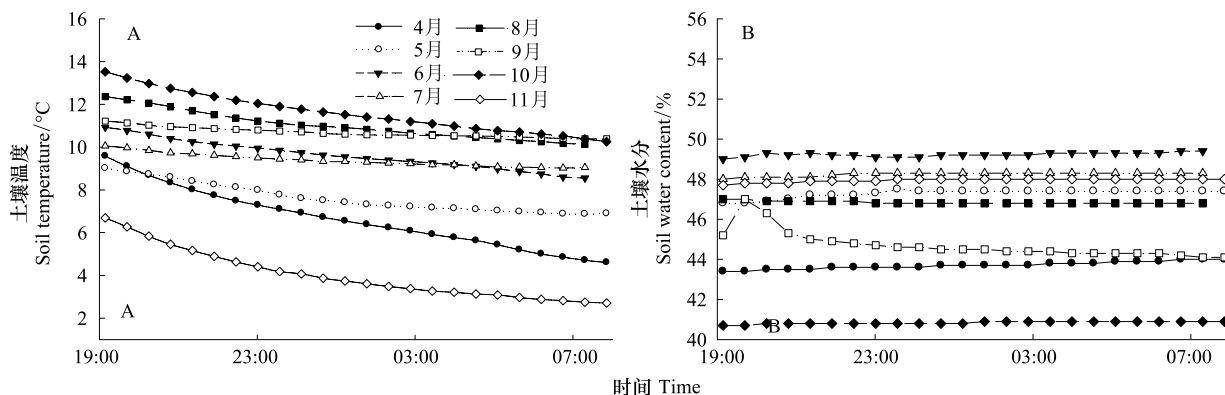


图2 土壤温度和土壤含水量的夜间变化

Fig.2 Nocturnal variations in soil temperature and water content in the alpine meadow

2.2 亚高山草甸土壤呼吸、土壤温度和土壤含水量的季节变化

从图3可知,草返青期(4—5月)和枯黄期(10—11月)的土壤呼吸显著低于草盛期(6—9月)的土壤呼吸($P < 0.01$),多重比较结果表明,土壤呼吸在返青期和枯黄期之间差异不显著($P > 0.05$)。返青期、草盛期和枯黄期的昼间土壤呼吸均值分别为(1.31 ± 0.48)、(2.35 ± 0.78)和(1.23 ± 0.67) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,变幅分别为 0.58 — 2.34 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 0.74 — 4.91 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0.35 — 2.38 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;夜间土壤呼吸均值分别为(1.34 ± 0.24) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、(1.94 ± 0.14) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和(1.23 ± 0.56) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,变幅分别为 0.92 — 1.81 、 1.63 — 2.32 和 0.49 — 2.29 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

昼、夜间土壤呼吸的时间变异没有明显的季节动态变化,而却呈现出显著的季节变化特征($P = 0.000$),

但变化规律并不一致。昼间土壤呼吸季节变化呈双峰型,峰值出现在6月($(2.69 \pm 0.67) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和8月中旬($(2.73 \pm 0.75) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (图3)。昼间土壤呼吸从4月开始上升,到6月后达到一次峰值后开始下降,到7月后又开始上升,8月达最大后开始持续下降,到11月最低;夜间土壤呼吸呈现“抛物线”变化趋势,即草盛期变化平缓,平均最大值与最小值的极差仅为 $0.07 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,最大值出现在9月($(1.97 \pm 0.09) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),同昼间土壤呼吸相比,夜间土壤呼吸最大值出现滞后现象。图3显示,在4月和7月夜间土壤呼吸均值高于昼间土壤呼吸,分别是昼间土壤呼吸的1.23和1.13倍,11月昼、夜间土壤呼吸相当(约为 $0.69 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),其它月份均为昼高夜低。

土壤5 cm深的温度总体上是昼间低于夜间(图4),平均低 0.94°C 。昼间土壤5 cm温度,从4月开始升高,到6月出现下降趋势,7月后又持续升高,10月后开始骤减,但时间变异性并没有明显的季节变化。从整个观测期来看,土壤昼间温度的排序为草盛期>枯黄期>返青期。草枯黄期土壤温度高于返青期,主要是由于在研究区10月温度较高所致,这与当地人们讲的“十月小阳天”说法一致;土壤温度夜间变化趋势与土壤温度昼间变化趋势相似。土壤5 cm含水量是夜间高于昼间,平均高6.06%。土壤含水量昼间均值变幅在 $(31.59 \pm 7.99)\%$ — $(44.39 \pm 3.51)\%$,平均 $(40.00 \pm 5.98)\%$,其中草盛期土壤含水量较高,这与研究地区降水量主要集中在5月至9月有关;土壤含水量夜间变化趋势似昼间,其变幅为 $(40.84 \pm 0.07)\%$ — $(49.23 \pm 0.10)\%$,平均为 $(46.06 \pm 2.65)\%$ 。

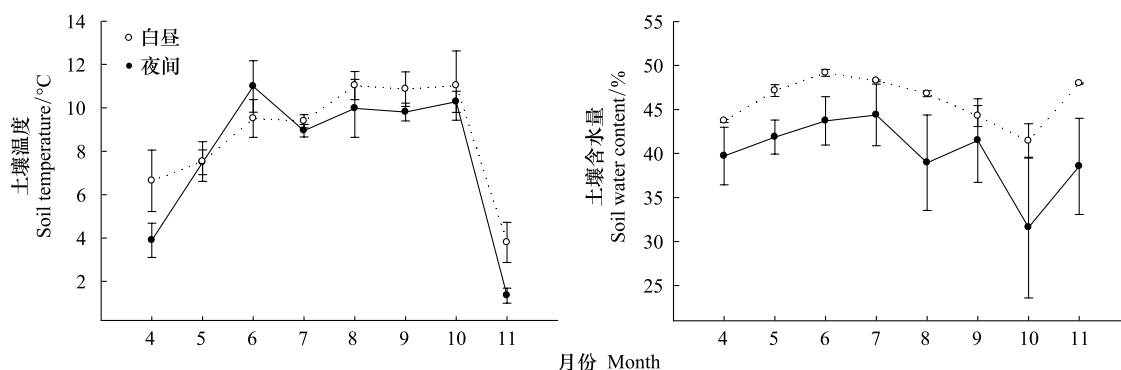


图4 地下5cm土温和水分含量的季节变化 ($n=7$)

Fig. 4 Seasonal variations in soil temperature and soil water content at the 5cm depth in day-time and night-time ($n=7$)

2.3 亚高山草甸昼间与夜间土壤呼吸的比较

整个观测期(4—11月)内,草甸昼间土壤呼吸的平均值比夜间土壤呼吸的平均值高13.70%,二者之间的关系可用幂函数方程 $R_{S(\text{daytime})} = 1.052R_{S(\text{nighttime})}^{1.011}$ ($R^2 = 0.471$, $P = 0.000$) 描述。以夜间土壤呼吸为自变量构建的幂函数方程可解释昼间土壤呼吸47.10%。方差分析的结果表明,草盛期昼、夜间土壤呼吸差异显著($P = 0.000$),昼间土壤呼吸比夜间的高20.19%,而草返青期和枯黄期的昼、夜间土壤呼吸差异不显著($P = 0.639$),昼间土壤呼吸仅比夜间的高1.77%。

2.4 土壤呼吸与土壤温度和含水量的关系

研究表明Lloyd和Taylor方程优越于Van't Hoff模型^[24, 27]。因为Lloyd和Taylor方程在Van't Hoff模型的基础上增加了生物学特性(活化能)的因素。为此,本研究用这两个模型来探讨土壤呼吸与土壤温度的

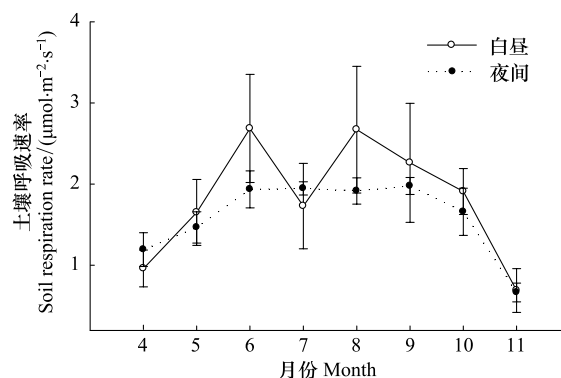


图3 昼夜间土壤呼吸的季节变化 ($n=7$)

Fig. 3 Seasonal variations in soil respirations in day-time and night-time ($n=7$)

关系。

整个观测期内,草甸昼、夜间土壤呼吸与土壤温度呈显著指数相关($P=0.000$)。Lloyd 等 Taylor 方程分别解释了昼、夜间的土壤呼吸变异的 69.2%、86.9% (表 1); Van't Hoff 模型解释了昼间土壤呼吸变异的 69.2%,夜间土壤呼吸变异的 84.2% (图 5);昼、夜间土壤呼吸均与土壤含水量解偶联。与单因子模型相比,昼间土壤呼吸与土壤温度、土壤水分含量的复合回归模型稍逊于 Lloyd and Taylor 方程优越于 Van't Hoff 模型($R_s=0.196T+0.008SWC-0.039$, $R^2=0.577$, $P=0.000$),而夜间土壤呼吸的复合回归模型解释其变异可达 92.4% ($R_s=0.184T+0.053SWC-2.468$, $R^2=0.924$, $P=0.000$)。

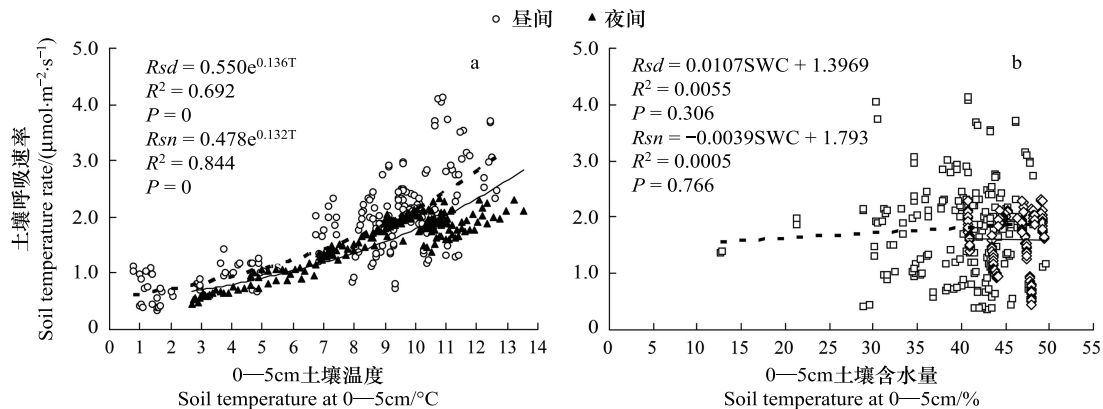


图 5 昼、夜间土壤呼吸与地下 5cm 土壤温度和水分含量的关系

Fig. 5 Relationships between soil respiration (R_s) and soil temperature (T) and soil water content (%) at the 5cm depth in the daytimes and nighttimes

图 6 和表 1 显示,草返青期、草盛期和枯黄期的土壤呼吸与昼、夜间土壤温度的相关性(Van't Hoff 模型和 Lloyd and Taylor 方程)均达显著指数相关水平($P=0.000$),其中 Van't Hoff 模型对草盛期昼、夜间的土壤呼吸的解释程度最低(分别为 23.7% 和 17.5%),枯黄期最高(分别为 74.3% 和 98.4%);Lloyd and Taylor 方程对草返青期、草盛期的土壤呼吸变异的解释程度与 Van't Hoff 模型相似,但在草枯黄期,Lloyd and Taylor 方程对昼、夜间的土壤呼吸变异解释程度(74.1% 和 74.2%)不及 Van't Hoff 模型(74.3% 和 98.4%);季节性的土壤呼吸与土壤含水量的线性相关,除草返青期的昼间、草盛期的昼夜间表现出不相关外($P>0.05$),其余均为显著相关($P<0.05$),相关性最好表现在枯黄期的夜间($R^2=0.906$)。与单因子模型相比,土壤呼吸与土壤温度和土壤水分含量二者交互效应的相关性均达显著水平($P=0.000$),表现为除返青期昼间土壤呼吸以土壤温度和土壤水分含量为参数的线性回归模型对土壤呼吸变异的解释程度略微低于以温度为参数的指数回归模

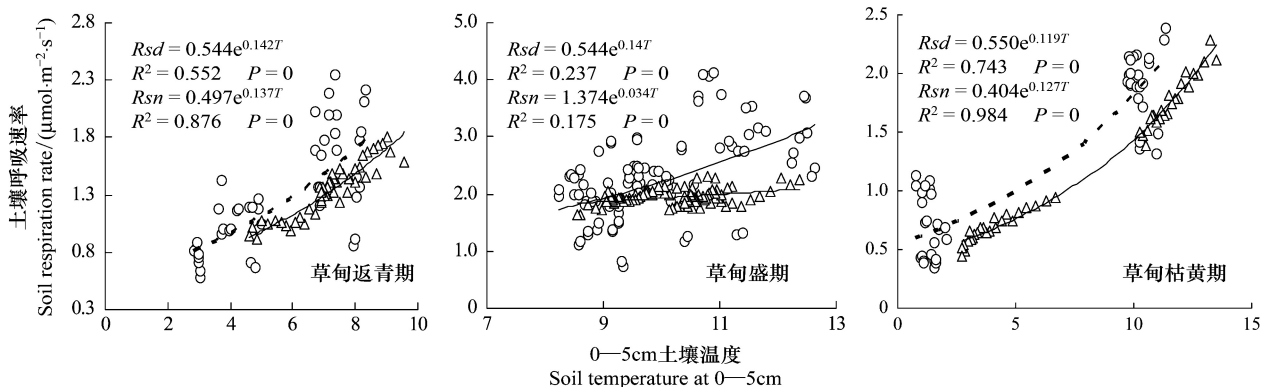


图 6 不同季节昼、夜间土壤呼吸与地下 5cm 土壤温度的关系

Fig. 6 Relationships between soil respiration (R_s) and soil temperature (T) at the 5cm depth in the daytimes and nighttimes in different seasons

型,其余均略高于单因子模型。

土壤呼吸与温度的关系可以从温度敏感性(Q_{10})来表征。由不同季节的土壤呼吸(R_s)与土壤 5 cm 的温度(T)拟合的 Van't Hoff 指数模型(图 5—图 6)计算所得结果:在整个观测期中,草甸昼间和夜间的 Q_{10} 值分别为 3.90 和 3.74;草返青期昼、夜间 Q_{10} 值分别为 4.14 和 3.94,草盛期分别为 4.06 和 1.40,草枯黄期分别为 3.29 和 3.56。

表 1 不同季节昼间和夜间土壤呼吸与土壤温度、水分含量和土壤温度与土壤含水量交互效应的相关性

Table 1 Regression equations of soil respiration (R_s) against soil temperature (T), and soil water content (SWC) in the daytime and nighttime

季节 Season	时间 Times	参数 Parameter	回归模型 Regression equation	F	相关系数 R^2	显著性 P
观测期	昼间	T	$R_s = 2.127e^{[371.53(\frac{1}{56.02} - \frac{1}{T+46.02})]}$	426.99	0.692	0.000
Measurement period	夜间	T	$R_s = 2.426e^{[388.38(\frac{1}{56.02} - \frac{1}{T+46.02})]}$	1254.86	0.869	0.000
草返青期	昼间	T	$R_s = 2.173e^{[380.15(\frac{1}{56.02} - \frac{1}{T+46.02})]}$	57.729	0.557	0.000
Green up		SWC	$R_s = 0.031SWC + 0.031$	1.690	0.035	0.200
		$T \times SWC$	$R_s = 0.776 + 0.186T - 0.013SWC$	25.789	0.534	0.000
	夜间	T	$R_s = 1.912e^{[383.00(\frac{1}{56.02} - \frac{1}{T+46.02})]}$	325.052	0.876	0.000
		SWC	$R_s = -1.969SWC + 0.073$	20.451	0.303	0.000
		$T \times SWC$	$R_s = -1.395 + 0.16T + 0.035SWC$	279.431	0.924	0.000
	草盛期	昼间	T	$R_s = 2.244e^{[444.899(\frac{1}{56.02} - \frac{1}{T+46.02})]}$	26.91	0.223
Exuberance		SWC	$R_s = -0.028SWC + 3.522$	2.68	0.029	0.100
		$T \times SWC$	$R_s = -0.220 + 0.326T - 0.016SWC$	16.65	0.264	0.000
	夜间	T	$R_s = 1.930e^{[107.88(\frac{1}{56.02} - \frac{1}{T+46.02})]}$	19.44	0.178	0.000
		SWC	$R_s = -0.028SWC + 3.522$	2.765	0.029	0.100
		$T \times SWC$	$R_s = 0.326T - 0.016SWC - 0.220$	16.651	0.264	0.000
	草枯黄期	昼间	T	$R_s = 1.817e^{[317.22(\frac{1}{56.02} - \frac{1}{T+46.02})]}$	131.927	0.741
Withering		SWC	$R_s = -0.032SWC + 2.437$	7.168	0.135	0.010
		$T \times SWC$	$R_s = 0.138T + 0.005SWC + 0.313$	102.789	0.820	0.000
	夜间	T	$R_s = 1.469e^{[364.79(\frac{1}{56.02} - \frac{1}{T+46.02})]}$	131.927	0.742	0.000
		SWC	$R_s = -0.153SWC + 7.999$	444.122	0.906	0.000
		$T \times SWC$	$R_s = -0.859 + 0.160T + 0.019SWC$	1026.838	0.979	0.000

T : 土壤 5cm 温度 Soil temperature at the 5cm depth; SWC: 土壤 5cm 水分含量 Soil water content at the 5cm depth

3 讨论

3.1 水热因子对草甸土壤呼吸的影响

一般情况下,一夜之内土壤水分含量及土壤理化性质不会发生显著变化。因此,夜间土壤呼吸变化主要受土壤温度变化的影响。夜间土壤呼吸与土壤 5cm 温度呈显著的指数正相关,二者均随时间变化而呈现下降趋势。8 次测定夜间土壤呼吸的变化表明,最低值均出现在 06:30—07:00 左右。但是,祁连山高山草甸夜间土壤呼吸最低值出现在 02:00—06:00^[20],内蒙古克氏针茅(*Stoma krylovii*)草原土壤夜间呼吸最低值出现在 04:00 左右^[28],海北嵩草草甸土壤夜间呼吸最低值出现在 06:00—08:00 左右^[8],苜蓿人工草地土壤呼吸在 6:00—8:00 之间出现最大值^[29]。可能解释的原因是研究区不同季节土壤微生物活性和根系呼吸对土壤温度和土壤含水量的敏感性不同所致^[30-32]

土壤呼吸是一个复杂生物学过程,包括土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸和植物根系呼吸 3 个部分,影响这些呼吸的主导环境因子并不相同,任何一种因子的改变都会导致土壤呼吸的变化,但土壤呼吸主要受控于温度和水分^[25, 33-34]。因此,用指数模型来解释土壤温度对土壤呼吸的影响^[35-36],用线性模型来解释土壤水分与

土壤呼吸的关系^[25, 36],但有时将二者结合更好。徐海红等对短花针茅荒漠草原土壤呼吸的研究表明,土壤呼吸与土壤温度呈显著负相关,与土壤水分含量显著正相关;Joo 等的研究显示,在土壤水分含量低于 20% 时,土壤呼吸与水分呈正相关,高于 20% 则呈现负相关^[37]。在本研究中,整个观测期的昼、夜间土壤呼吸变化与地下 5 cm 土壤温度显著的指数正相关($P < 0.05$),而与土壤水分含量解偶联(图 5)。出现这种现象可能是由于研究区地处四川盆地向青藏高原的过度带,其特殊的气候、生境条件和物种组成所导致生产的。从川西亚高山草甸土壤呼吸与土壤温度和土壤含水量复合模型来看,土壤温度和土壤含水量交互作用对昼间土壤呼吸变异的解释程度(57.7%)低于以土壤温度为自变量构建的 Van't Hoff 和 Lloyd 和 Taylor 方程指数模型的解释程度(69.2% 和 69.2%),说明在昼间土壤呼吸主要受控于土壤温度,这与 Dornbush 等的研究结果相同^[38]。对夜间土壤呼吸而言,土壤温度和土壤含水量交互作用对土壤呼吸变异的解释程度(92.4%)高于土壤温度(84.4% 和 86.9%),与常宗强等在黑河流域山区牧草地的得出土壤呼吸是主要受土壤温度和水分含量共同影响的结果相似。因此,本研究结果说明,土壤呼吸通量的估测,昼间用土壤温度为参数构建指数模型,夜间用土壤温度和水分作为参数构建线性模型。此外,本研究得出的 Van't Hoff 模型与 Lloyd 和 Taylor 方程均也可为亚高山地区草甸的整个观测期土壤呼吸预测的模型,拟合度 R^2 在 69% 以上,与已有的研究结果一致^[19, 39]。

从草返青期、草盛期和枯黄期土壤呼吸的季节变化格局来看,返青期昼间和草盛期的昼、夜间土壤呼吸与土壤水分均表现为解偶联现象(表 1),其土壤呼吸主要受土壤温度的影响^[40, 41];在草盛期,土壤温度与土壤呼吸的 Van't Hoff 指数模型和 Lloyd and Taylor 方程相关性虽达到显著水平,但它们仅可解释昼、夜间土壤呼吸变异的 22.7% 和 22.3%、17.5% 和 17.8%,这说明在草盛期除了土壤温度和土壤含水量因子影响昼、夜间土壤呼吸以外,还受到微生物数量的差异及其活性的影响^[42-43],同时还与光合作用处于全年最强时期等因素有关^[44]。草枯黄期,以土壤温度和土壤含水量为参数的线性回归模型(表 1)和以温度为参数的 Van't Hoff 指数模型对昼、夜间土壤呼吸变异的解释程度(图 6)可知,枯黄期昼间土壤呼吸的主要影响因子是土壤温度和土壤含水量,夜间则主要是土壤温度。

3.2 昼、夜间土壤呼吸对草甸土壤总呼吸的贡献

Chang 等研究表明祁连山高山草甸夜间土壤呼吸维持较低水平,昼间较高。Grahammer 等在堪萨斯州东北部高草草原的研究也发现了类似的结果,但差异不显著^[45]。冯文婷等研究表明,中山湿性常绿阔叶林的夜间土壤呼吸大于昼间土壤呼吸。本研究结果与 Chang 等和 Grahammer 等的研究结果相似。整个观测期,昼间土壤呼吸占土壤总呼吸的 53.03%,夜间占 46.97%。其中,草盛期昼间土壤呼吸显著高于夜间土壤呼吸,主要由于在草盛期植物的光合速率较高所致^[38, 46];草返青期和枯黄期的昼、夜间土壤呼吸差异不显著,这表明昼、夜间土壤呼吸对土壤总呼吸的贡献比例是随草甸发育的季节而变化,这可能是由季节性气候变化而引起植物生长的协同变化所决定的^[47]。因此,要提高土壤呼吸估算的精度,应重视夜间土壤呼吸的测定,尤其是在草甸植物生长的旺盛期。

3.3 土壤温度对 Q_{10} 值的影响

草甸不同季节的土壤呼吸与土壤温度拟合的指数方程计算 Q_{10} 值表现为,昼、夜间的 Q_{10} 值随草甸植被发育期的不同而变化。除枯黄期外,其它季节的昼间 Q_{10} 值均高于夜间 Q_{10} 值,草盛期差值最大,说明了土壤呼吸对温度敏感性随昼、夜和季节的变化而变化。本研究中,整个观测期的 Q_{10} 值(3.90 和 3.74)高于黑河流域牧坡草地测得的 Q_{10} 值(2.16)^[48]和我国科尔沁草甸的 Q_{10} 值(2.88)^[12],但是低于青藏高原高山草甸土壤的 Q_{10} 值(7.6)^[49],这有可能是因为在温度较低的环境条件下的 Q_{10} 值较高^[50]。本研究发现,草返青期、草盛期和枯黄期昼、夜间 Q_{10} 值存在差异,首先可能是植物处于不同的物候发育期,昼、夜间土壤温度的差异及植物根呼吸的贡献率不同而引起 Q_{10} 值的变化^[51-52],这一点在草盛期表现尤为突显;其次可能因为不同季节地上凋落物分解程度的不同引起土壤有机质的变化^[2, 53],进而使得土壤呼吸中的土壤微生物呼吸发生变化。用 Q_{10} 值推算土壤碳的排放量,除了考虑温度和水分外,还需要确定其它影响因素,如植物的生理指标、凋落物量以及土壤有机碳组分等。

4 结论

(1) 整个观测期,夜间土壤呼吸占总土壤呼吸的 46.79%,并随草甸发育阶段的变化而变化。草盛期的昼、夜土壤呼吸占有较大比例,且昼、夜土壤呼吸的差值最大($0.41 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),而草返青期和枯黄期的昼、夜土壤呼吸速率相当。

(2) 观测期内的昼、夜间土壤呼吸呈现出显著的季节变化特征,这种变化与土壤温度关系密切。在水分较为充足的亚高山草甸,整个观测期内昼间土壤呼吸的预测, Van't Hoff 指数模型和 Lloyd and Taylor 方程均是适合其预测的单因子模型;与单因子模型相比,夜间土壤呼吸的估算,二元回归模型较单因子模型的效果更好。

(3) 草甸发育的不同阶段,土壤温度及其与土壤含水量的交互效应均对昼、夜间的土壤呼吸产生显著的影响,而土壤含水量则仅对草返青期昼间及枯黄期昼、夜间的土壤呼吸产生显著影响;它们对昼、夜间土壤呼吸变异的解释程度均存在不同程度的差异。草返青期夜间和草盛期昼、夜间以及枯黄期昼间的土壤呼吸的预测可采用二元回归模型;草返青期的昼间和枯黄期夜间的土壤呼吸的预测可用单因子指数模型。

(4) 整个观测期,草甸昼间和夜间的 Q_{10} 值分别为 3.90 和 3.74。在草甸发育的不同阶段,土壤呼吸对温度的敏感性也存在差异:草返青期的昼、夜间 Q_{10} 值分别为 4.14 和 3.94,草盛期为 4.06 和 1.40,枯黄期为 3.29 和 3.56。

综上所述,为较为精确的预测亚高山草甸土壤呼吸的季节通量和年通量,需要加强草甸夜间土壤呼吸的测定,而且还应考虑昼、夜间土壤温度和土壤水分及其他生物因子的影响。

References:

- [1] Jin Z, Qi Y C, Dong Y S, Domroes M. Seasonal patterns of soil respiration in three types of communities along grass-desert shrub transition in Inner Mongolia, China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(3): 503-512.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81-99.
- [3] Canadell J G, Raupach M R. Managing forests for climate change mitigation. *Science*, 2008, 320(5882): 1456-1457.
- [4] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochem. Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [5] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [6] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(2): 205-218.
- [7] Sun B G, Long R J, Kong Z, Feng R Z. A study on CO_2 emission rate from alpine meadow in the source region of Yellow River in Guo-luo, Qinghai Province. *Acta Agrestia Sinica*, 2007, 15(5): 449-453.
- [8] Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, Zhao X Q, Zhou X M. Carbon dioxide emission of Mat cryo-sod soil in the Haibei alpine meadow ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(4): 544-549.
- [9] Shi F, Wu Y, Wu N, Luo P. Different growth and physiological responses to experimental warming of two dominant plant species *Elymus nutans* and *Potentilla anserina* in an alpine meadow of the eastern Tibetan Plateau. *Photosynthetica*, 2010, 48(3): 437-445.
- [10] Tao Z, Shen C D, Gao Q Z, Sun Y M, Yi W X, Li Y N. Soil organic matter stock and CO_2 flux in alpine meadow steppe. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(4): 553-563.
- [11] Wang M J, Zhao M L, Cui G W, Han G D. Effect of grazing intensities on vegetation and soil in meadow steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(6): 758-762.
- [12] Chen N N, Guan D X, Jin C, Yuan F H, Yang H. Characteristics of soil respiration on Horqin meadow. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, 33(5): 82-86.
- [13] Lin X W, Zhang Z H, Wang S P, Hu Y G, Xu G G, Luo C Y, Chang X F, Duan J C, Lin Q Y, Xu B, Wang Y F, Zhao X Q, Xie Z B. Response of ecosystem respiration to warming and grazing during the growing seasons in the alpine meadow on the Tibetan plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 792-802.
- [14] Song M H, Jiang J, Cao G M, Xu X L. Effects of temperature, glucose and inorganic nitrogen inputs on carbon mineralization in a Tibetan alpine meadow soil. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(6): 375-380.
- [15] Liptzin D, Williams M, Helmig D, Seok B, Filippa G, Chowanski K, Hueber J. Process-level controls on CO_2 fluxes from a seasonally snow-covered subalpine meadow soil, Niwot Ridge, Colorado. *Biogeochemistry*, 2009, 95(1): 151-166.
- [16] Yi X F, Yang Y Q. A stable carbon isotopic approach for understanding the CO_2 flux at the Haibei Alpine Meadow Ecosystem—A simple model. *Ecological Modelling*, 2006, 193(3/4): 796-800.
- [17] Stark S, Kytöviita M M. Simulated grazer effects on microbial respiration in a subarctic meadow: Implications for nutrient competition between

- plants and soil microorganisms. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(1/2): 20-31.
- [18] Wohlfahrt G, Bahn M, Haslwanter A, Newesely C, Cernusca A. Estimation of daytime ecosystem respiration to determine gross primary production of a mountain meadow. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130(1/2): 13-25.
- [19] Wang J, Sha L Q, Li J Z, Feng Z L. CO₂ efflux under different grazing managements on subalpine meadows of Shangri-La, Northwest Yunnan Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3574-3583.
- [20] Chang Z Q, Feng Q, Si J H, Su Y H, Xi H Y, Guo R. Analysis of the spatial and temporal changes in soil CO₂ efflux and its related factors from alpine meadow in qilian mountains. *Environmental Science*, 2007, 28(10): 2389-2395.
- [21] Li G Y, Sun S C. Plant clipping may cause overestimation of soil respiration in a Tibetan alpine meadow, southwest China. *Ecological Research*, 2011, 26(3): 497-504.
- [22] Price C, Melnikov A. Diurnal, seasonal and inter-annual variations in the Schumann resonance parameters. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66(13/14): 1179-1185.
- [23] Janssens I A, Pilegaard K I M. Large seasonal changes in Q₁₀ of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology*, 2003, 9(6): 911-918.
- [24] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315-323.
- [25] Wang B, Jiang Y, Wei X, Zhao G, Guo H, Bai X. Effects of forest type, stand age, and altitude on soil respiration in subtropical forests of China. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2011, 26(1): 40-47.
- [26] Wang C, Yang J, Zhang Q. Soil respiration in six temperate forests in China. *Global Change Biology*, 2006, 12(11): 2103-2114.
- [27] Jiang Y, Wang B, Wang Y R. Spatial and temporal variation of soil respiration and models of *Phyllostachys pubescens* in Dagangshan of Jiangxi. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2010, 34(6): 47-52.
- [28] Shi G X, Geng H L, Wang Y L, Wang Y H, Qi X R. Daily and seasonal dynamics of soil respiration and their environmental controlling factors in *Stipa krylovii* steppe. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(7): 3408-3416.
- [29] Xu L J, Tang H J, Yang G X, Xin X P. Soil respiration characteristic and response to soil-atmosphere in different Alfalfa Rangeland. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2010, 30(9): 1882-1886.
- [30] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396(6711): 570-572.
- [31] Yang Q P, Xu M, Liu H S, Wang J S, Liu L X, Chi Y G, Zheng Y P. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [32] Zhao Y H, Zhao L, Du E J, Liu G Y, Yue G Y. Study on the CO₂ flux characteristic in the Tanggula alpine meadow ecosystem of the Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(2): 525-531.
- [33] Nakano T, Nemoto M, Shinoda M. Environmental controls on photosynthetic production and ecosystem respiration in semi-arid grasslands of Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1456-1466.
- [34] Xu H H, Hou X Y, Na R S. Dynamics of soil respiration under different grazing systems in a *Stipabreviflora* desert steppe. *Acta Pratacul Turae Sinica*, 2011, 20(2): 219-226.
- [35] Vesterdal L, Elberling B, Christiansen J R, Callesen I, Schmidt I K. Soil respiration and rates of soil carbon turnover differ among six common European tree species. *Forest Ecology and Management*, 2012, 264: 185-196.
- [36] Li L H, Wang Q B, Bai Y F, Zhou G S, Xing X R. Soil respiration of a *Leymus Chinensis* grassland stand in the Xilin river basin as affected by over-grazing and climate. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(6): 680-686.
- [37] Joo S J, Park S U, Park M S, Lee C S. Estimation of soil respiration using automated chamber systems in an oak (*Quercus mongolica*) forest at the Nam-San site in Seoul, Korea. *Science of The Total Environment*, 2012, 416: 400-409.
- [38] Dornbush M, Raich J. Soil temperature, not aboveground plant productivity, best predicts intra-annual variations of soil respiration in central iowa grasslands. *Ecosystems*, 2006, 9(6): 909-920.
- [39] Jiang Y, Wang B, Wang Y R, Yang Q P. Soil respiration in subtropical forests and model simulation of its relationships with soil temperature and moisture content. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1641-1648.
- [40] Zhou D W, Cao G M, Zhang J X, Zhao X Q, Zhou X M. CO₂ flux characteristics from degenerated mat cryo-sod soil during plant growing period. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(3): 367-371.
- [41] Geng Y B, Luo G Q. Analysis of affecting factors and partitioning of respiration in a *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1058-1068.
- [42] Feng W T, Zou X M, Sha L Q, Chen J H, Feng Z L, Li J Z. Comparisons between seasonal and diurnal patterns of soil respiration in a montane evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountains, China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(1): 31-39.
- [43] Högberg P, Nordgren A, Buchmann N, Taylor A F S, Ekblad A, Högberg M N, Nyberg G, Ottosson-Löfvenius M, Read D J. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, 2001, 411(6839): 789-792.
- [44] Bahn M, Schmitt M, Siegwolf R, Richter A, Brüggemann N. Does photosynthesis affect grassland soil-respired CO₂ and its carbon isotope composition on a diurnal timescale? *New Phytologist*, 2009, 182(2): 451-460.
- [45] Grahammer K, Jawson M D, Skopp J. Day and night soil respiration from a grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(1): 77-81.
- [46] Bremer D J, Ham J M, Owensby C E, Knapp A K. Responses of soil respiration to clipping and grazing in a tallgrass prairie. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(6): 1539-1548.
- [47] Zhang J C, Kong Y G, Wang Y H, Yang C Q, Hu D M. Components separation of soil respiration in two typical shelter forestlands in silting coastal

- area, Northern Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3144-3154.
- [48] Chang Z Q, Shi Z M, Feng Q, Su Y H. Temporal variation of soil respiration on sloping pasture of Heihe River basin and effects of temperature and soil moisture on it. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1603-1606.
- [49] Suh S, Lee E, Lee J. Temperature and moisture sensitivities of CO₂ efflux from lowland and alpine meadow soils. *Journal of Plant Ecology*, 2009, 2(4): 225-231.
- [50] Shi P L, Zhang X Z, Zhong Z M, Ouyang H. Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 220-233.
- [51] Yang J Y, Wang C K. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO₂ flux of forests in northeastern China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2): 286-294.
- [52] Cooper E. Out of sight, out of mind: thermal acclimation of root respiration in Arctic *Ranunculus*. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2004, 36(3): 308-313.
- [53] Zhou P, Liu G B, Xue S. Review of soil respiration and the impact factors on grassland ecosystem. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(2): 184-193.

参考文献:

- [7] 孙步功, 龙瑞军, 郑孔, 冯瑞章. 青海果洛黄河源区高寒草甸 CO₂ 释放速率研究. *草地学报*, 2007, 15(5): 449-453.
- [8] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 赵新全, 周兴民. 草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放特征. *生态学报*, 2001, 21(4): 544-549.
- [10] 陶贞, 沈承德, 高全洲, 孙彦敏, 易惟熙, 李英年. 高寒草甸土壤有机碳储量和 CO₂ 通量. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(4): 553-563.
- [11] 王明君, 赵萌萌, 崔国文, 韩国栋. 放牧对草甸草原植被和土壤的影响. *草地学报*, 2010, 18(6): 758-762.
- [12] 陈妮娜, 关德新, 金昌杰, 袁凤辉, 杨弘. 科尔沁草甸草地土壤呼吸特征. *中国草地学报*, 2011, 33(5): 82-86.
- [20] 常宗强, 冯起, 司建华, 苏永红, 席海洋, 郭瑞. 祁连山高山草甸土壤 CO₂ 通量的时空变化及其影响分析. *环境科学*, 2007, 28(10): 2389-2395.
- [27] 姜艳, 王兵, 汪玉如. 江西大岗山毛竹林土壤呼吸时空变异及模型模拟. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(6): 47-52.
- [28] 师广旭, 耿浩林, 王云龙, 王玉辉, 齐晓荣. 克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 草原土壤呼吸及其影响因子. *生态学报*, 2008, 28(7): 3408-3416.
- [29] 徐丽君, 唐华俊, 杨桂霞, 辛晓平. 不同苜蓿品种人工草地土壤呼吸及对土气温度反应. *西北植物学报*, 2010, 30(9): 1882-1886.
- [31] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 王劲松, 刘丽香, 迟永刚, 郑云普. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性. *生态学报*, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [32] 赵拥华, 赵林, 杜二计, 广岳, 岳广阳. 唐古拉地区高寒草甸生态系统 CO₂ 通量特征研究. *高原气象*, 2011, 30(2): 525-531.
- [34] 徐海红, 侯向阳, 那日苏. 不同放牧制度下短花针茅荒漠草原土壤呼吸动态研究. *草业学报*, 2011, 20(2): 219-226.
- [36] 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 周广胜, 邢雪荣. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 680-686.
- [39] 姜艳, 王兵, 汪玉如, 杨清培. 亚热带林分土壤呼吸及其与土壤温湿度关系的模型模拟. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1641-1648.
- [40] 周党卫, 曹广民, 张金霞, 赵新全, 周兴民. 植物生长季退化草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放特征. *应用生态学报*, 2003, 14(3): 367-371.
- [41] 耿元波, 罗光强. 内蒙古羊草草原呼吸的影响因素分析和区分. *地理学报*, 2010, 65(9): 1058-1068.
- [42] 冯文婷, 邹晓明, 沙丽清, 陈建会, 冯志立, 李检舟. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 31-39.
- [47] 张金池, 孔雨光, 王因花, 杨传强, 胡丁猛. 苏北淤泥质海岸典型防护林地土壤呼吸组分分离. *生态学报*, 2010, 30(12): 3144-3154.
- [48] 常宗强, 史作民, 冯起, 苏永红. 黑河流域山区牧坡草地土壤呼吸的时间变化及水热因子影响. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1603-1606.
- [51] 杨金艳, 王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面 CO₂ 通量的影响. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 286-294.
- [53] 周萍, 刘国彬, 薛莲. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展. *草业学报*, 2009, 18(2): 184-193.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 20 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Characteristics of nitrous oxide (N ₂ O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin	YUAN Shufang, WANG Weidong (6279)
Nutrient dynamics of the litters during standing and sediment surface decay in the Min River estuarine marsh	ZENG Congsheng, ZHANG Linhai, WANG Tian'e, et al (6289)
Diversity and distribution of endophytic bacteria isolated from <i>Caragana microphylla</i> grown in desert grassland in Ningxia	DAI Jinxia, WANG Yujiong (6300)
Spatial distribution of <i>Trabala vishnou gigantina</i> Yang pupae in Shaanxi Province, China	ZHANG Yiqiao, ZONG Shixiang, LIU Yonghua, et al (6308)
Effects of drought stress on <i>Cyclobalanopsis glauca</i> seedlings under simulating karst environment condition	ZHANG Zhongfeng, YOU Yeming, HUANG Yuqing, et al (6318)
Ecosystem diversity in Jinggangshan area, China	CHEN Baoming, LIN Zhengguang, LI Zhen, et al (6326)
Niche dynamics during restoration process for the dominant tree species in montane mixed evergreen and deciduous broadleaved forests at Mulinzi of southwest Hubei	TANG Jingming, AI Xuenru, YI Yongmei, et al (6334)
Effects of different day/night warming on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> seedlings	XU Xingli, JIN Zexin, HE Weiming, et al (6343)
The effect of simulated chronic high wind on the phenotype of <i>Salsola arbuscula</i>	NAN Jiang, ZHAO Xiaoying, YU Baofeng (6354)
Responses of N and P stoichiometry on mulching management in the stand of <i>Phyllostachys praecox</i>	GUO Ziwu, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (6361)
Tree-ring-based reconstruction of the temperature variations in February and March since 1890 AD in southern Jiangxi Province, China	CAO Shoujin, CAO Fuxiang, XIANG Wenhua (6369)
Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in western Sichuan Province, China	HU Zongda, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (6376)
Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of <i>Betula platyphylla</i> and <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> swamps in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China	ZHOU Wenchang, MU Changcheng, LIU Xia, et al (6387)
Variance analysis of soil carbon sequestration under three typical forest lands converted from farmland in a Loess Hilly Area	TONG Xiaogang, HAN Xinhui, WU Faqi, et al (6396)
Soil-property and plant diversity of highway rocky slopes	PAN Shulin, GU Bin, LI Jiaxiang (6404)
Effects of slope position on soil microbial biomass of <i>Quercus liaotungensis</i> forest in Dongling Mountain	ZHANG Di, ZHANG Yuxin, QU Laiye, et al (6412)
Responses of water quality to landscape pattern in Taihu watershed: case study of 3 typical streams in Yixing	WANG Ying, ZHANG Jianfeng, CHEN Guangcai, et al (6422)
Study on the fairness of resource-environment system of Jiangxi Province based on different methods of Gini coefficient	HUANG Heping (6431)
Simulation of the spatial pattern of land use change in China: the case of planned development scenario	SUN Xiaofang, YUE Tianxiang, FAN Zemeng (6440)
Arable land change dynamics and their driving forces for the major countries of the world	ZHAO Wenwu (6452)
Denitrification characteristics of an aerobic denitrifying bacterium <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 using different sources of nitrogen	XIAO Jibo, JIANG Huixia, CHU Shuyi (6463)
Study on sustainable development in nanjing based on ecological footprint model	ZHOU Jing, GUAN Weihua (6471)
Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province	CAI Zhenhua, SHEN Laixin, LIU Junguo, et al (6481)
Correlation analysis of spatial variability of Soil available nitrogen and household nitrogen inputs at Pujiang County	FANG Bin, WU Jinfeng, NI Shaoxiang (6489)
Characteristics of the fish assemblages in the intertidal salt marsh zone and adjacent mudflat in the Yangtze Estuary	TONG Chunfu (6501)
A comparison study on the secondary production of macrobenthos in different wetland habitats in Shenzhen Bay	ZHOU Fufang, SHI Xiuhua, QIU Guoyu, et al (6511)
Regurgitant from <i>Orgyia ericae</i> Germar induces calcium influx and accumulation of hydrogen peroxide in <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> (Maxim. ex Kom.) Cheng f. cells	GAO Haibo, ZHANG Shujing, SHEN Yingbai (6520)
Behavior characteristics and habitat adaptabilities of the endangered butterfly <i>Teinopalpus aureus</i> in Mount Dayao	ZENG Juping, ZHOU Shanyi, DING Jian, et al (6527)
Community structure and dynamics of fig wasps in syconia of <i>Ficus microcarpa</i> Linn. f. in Fuzhou	WU Wenshan, ZHANG Yanjie, LI Fengyu, et al (6535)
Review and Monograph	
Review and trend of eco-compensation mechanism on river basin	ZHANG Zhiqiang, CHENG Li, SHANG Haiyang, et al (6543)
Definition and research progress of sustainable consumption: from industrial ecology view	LIU Jingru, LIU Ruiquan, YAO Liang (6553)
The estimation and application of the water footprint in industrial processes	JIA Jia, YAN Yan, WANG Chenxing, et al (6558)
Research progress in ecological risk assessment of mining area	PAN Yajing, WANG Yanglin, PENG Jian, et al (6566)
Scientific Note	
Litter amount and its dynamic change of four typical plant community under the fenced condition in desert steppe	LI Xuebin, CHEN Lin, ZHANG Shuoxin, et al (6575)
Effects of planting densities and modes on activities of some enzymes and yield in summer maize	LI Hongqi, LIN Haiming, LIANG Shurong, et al (6584)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 20 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 20 (October, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元