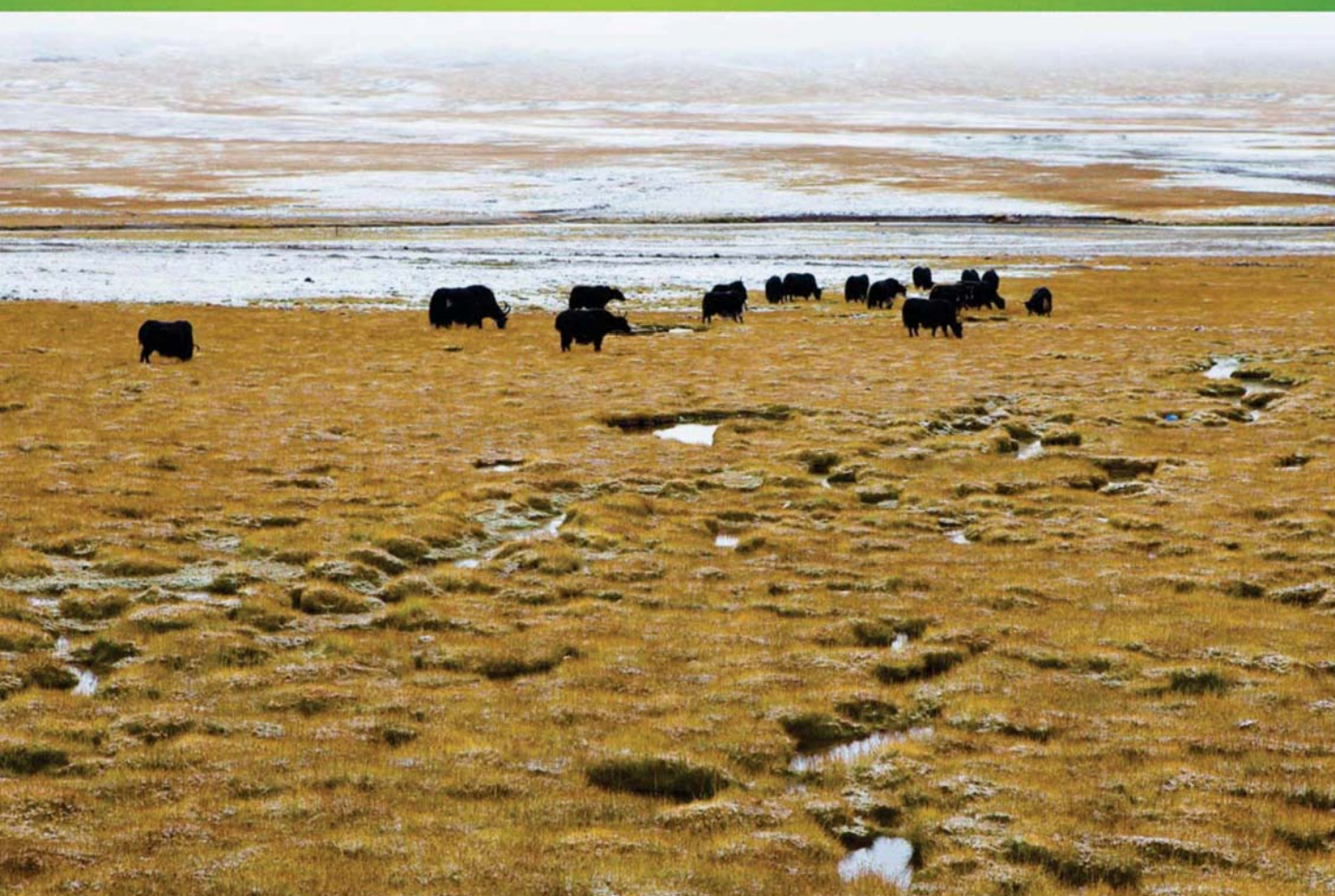


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第16期 Vol.33 No.16 **2013**

中国生态学学会
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 33 卷 第 16 期 2013 年 8 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 物种分布模型理论研究进展..... 李国庆,刘长成,刘玉国,等 (4827)
- 稀土元素对农田生态系统的影响研究进展..... 金姝兰,黄益宗 (4836)
- 藤壶金星幼虫附着变态机制..... 饶小珍,林 岗,许友勤 (4846)
- 群居动物中的共同决策..... 王程亮,王晓卫,齐晓光,等 (4857)

个体与基础生态

- 季风进退和转换对中国褐飞虱迁飞的影响..... 包云轩,黄金颖,谢晓金,等 (4864)
- 两种海星对三种双壳贝类的捕食选择性和摄食率..... 齐占会,王 珺,毛玉泽,等 (4878)
- 新疆巴音布鲁克繁殖期大天鹅的生境选择..... 董 超,张国钢,陆 军,等 (4885)
- 我国特有植物青檀遗传结构的 ISSR 分析..... 李晓红,张 慧,王德元,等 (4892)
- 栽培菊花与菊属-近缘属属间杂种杂交后代耐盐性的遗传分析..... 许莉莉,陈发棣,陈素梅,等 (4902)
- 荒漠区植物光合器官解剖结构对水分利用效率的指示作用..... 张海娜,苏培玺,李善家,等 (4909)
- 水分对番茄不同叶龄叶片光合作用的影响..... 陈凯利,李建明,贺会强,等 (4919)
- 广西猫儿山不同海拔常绿树种和落叶树种光合速率与氮的关系..... 白坤栋,蒋得斌,万贤崇 (4930)
- 施肥对板栗林地土壤 N_2O 通量动态变化的影响..... 张蛟蛟,李永夫,姜培坤,等 (4939)
- 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响..... 刘希玉,王忠强,张心昱,等 (4949)

种群、群落和生态系统

- 大兴安岭天然沼泽湿地生态系统碳储量..... 牟长城,王 彪,卢慧翠,等 (4956)
- 基于多时相 Landsat TM 影像的汶川地震灾区河岸带植被覆盖动态监测——以岷江河谷映秀-汶川段
为例..... 许积层,唐 斌,卢 涛 (4966)
- 不同强度火干扰下盘古林场天然落叶松林的空间结构..... 倪宝龙,刘兆刚 (4975)
- 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素..... 蔡永久,姜加虎,张 路,等 (4985)
- 千岛湖岛屿社鼠的种群年龄结构和性比..... 张 旭,鲍毅新,刘 军,等 (5000)
- 性信息素诱捕下害虫 Logistic 增长及经济阈值数学模型..... 赵志国,荣二花,赵志红,等 (5008)
- 秋末苏南茶园昆虫的群落组成及其趋色性..... 郑颖姘,钮羽群,崔桂玲,等 (5017)
- 北方常见农业土地利用方式对土壤螨群落结构的影响..... 韩雪梅,李丹丹,梁子安,等 (5026)

景观、区域和全球生态

- 基于鸟类边缘种行为的景观连接度研究——空间句法的反规划应用..... 杨天翔,张韦倩,樊正球,等 (5035)
- 西南高山地区土壤异养呼吸时空动态..... 张远东,庞 瑞,顾峰雪,等 (5047)

江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素..... 赵明松,张甘霖,李德成,等 (5058)

基于林业清查资料的桂西北植被碳空间分布及其变化特征..... 张明阳,罗为检,刘会玉,等 (5067)

资源与产业生态

基于能值分析方法的都市代谢过程——案例研究 刘耕源,杨志峰,陈 彬 (5078)

基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价 张 锐,郑华伟,刘友兆 (5090)

保水剂对煤矸石基质上高羊茅生长及营养吸收的影响 赵陟峰,王冬梅,赵廷宁 (5101)

城乡与社会生态

生态保护价值的距离衰减性——以三江平原湿地为例 敖长林,陈瑾婷,焦 扬,等 (5109)

研究简报

广东山区土壤有机碳空间变异的尺度效应..... 姜 春,吴志峰,钱乐祥,等 (5118)

室内养殖雌性松鼠秋季换毛期被毛长度和保温性能变化..... 荆 璞,张 伟,华 彦,等 (5126)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-08



封面图说：高寒草甸牦牛群——三江源区位于青藏高原腹地，平均海拔 4200m，是长江、黄河、澜沧江三条大河的发源地，也是全球气候变化最敏感的地区。三江源区高寒草甸植被状况对该区的生态环境、草地资源合理利用和应对全球气候变化具有十分重要的意义。2005 年以来，国家投资 70 多亿元启动三江源生态保护工程。监测显示，近年来，三江源湖泊湿地面积逐步扩大，植被覆盖度得到提高，三江源区高寒草甸的生态恶化趋势得到遏制。图为冒着风雪在三江源高寒草甸上吃草的牦牛群。

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

DOI: 10.5846/stxb201211191624

张远东, 庞瑞, 顾峰雪, 刘世荣. 西南高山地区土壤异养呼吸时空动态. 生态学报, 2013, 33(16): 5047-5057.

Zhang Y D, Pang R, Gu F X, Liu S R. Temporal-spatial variation of heterotrophic respiration in alpine area of southwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 5047-5057.

西南高山地区土壤异养呼吸时空动态

张远东¹, 庞 瑞¹, 顾峰雪^{2,*}, 刘世荣¹

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

2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部旱作节水农业重点实验室, 北京 100081)

摘要: 土壤异养呼吸是陆地和大气之间的重要通量, 是决定陆地生态系统碳源汇的关键因素之一, 与气候变化紧密相关。西南高山地区是响应气候变化的重点区域, 研究西南高山地区土壤异养呼吸动态及其对气候变化的响应, 对于评估区域碳循环对全球气候变化的贡献具有重要意义。应用生态系统模型(CEVSA)模型估算了 1954—2010 年西南高山地区土壤异养呼吸(HR)的时空变化, 分析了其对气候变化的响应。结果表明: (1) 西南高山地区 1954—2010 年平均异养呼吸量为 $422 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 在空间分布上, HR 自东南向西北递减, 与年平均温度($r=0.721, P<0.01$)、年降水量($r=0.564, P<0.01$)均显著正相关; (2) 在时间尺度上, 西南高山地区 1954—2010 年 HR 总量增加趋势显著($P<0.05$), 变化范围为 $197\text{—}251 \text{ Tg C/a}$, 平均每年增加 0.710 Tg C , 其中主要植被类型草地、常绿针叶林和常绿阔叶林均增加趋势显著($P<0.01$), 增加速度分别为 1.621 、 1.496 和 $1.055 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$ 。(3) 土壤 HR 的年际变化主要受温度影响, 且西北部高海拔地区较东南部低海拔对温度变化更为敏感, 主要植被类型温度敏感系数 Q_{10} 从大到小依次为草地(2.35)、常绿针叶林(2.34)、常绿阔叶林(1.93)。

关键词: 异养呼吸; 高山地区; 气候变化; CEVSA 模型

Temporal-spatial variation of heterotrophic respiration in alpine area of southwestern China

ZHANG Yuandong¹, PANG Rui¹, GU Fengxue^{2,*}, LIU Shirong¹

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

2 Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Soil heterotrophic respiration is a major flux of CO_2 between terrestrial ecosystems and the atmosphere. It is defined as the sum of carbon releases as gaseous products in the microbial decomposition of soil carbon pool. Soil heterotrophic respiration plays a critical role in regulating the global carbon cycle and is potentially sensitive to climate changes in the future. The alpine area of southwestern China is one of the most sensitive areas to climate change. Therefore, it is of great importance to investigate the response of soil heterotrophic respiration to climate in this region for evaluating the contribution of regional carbon cycle to global climate changes.

A process-based biogeochemical model CEVSA (Carbon Exchange between Vegetation, Soil, and the Atmosphere) was used to estimate the temporal and spatial variations of soil heterotrophic respiration (HR) in alpine area of southwestern China during the period from 1954 to 2010. We conducted CEVSA model with observation-based data sets of climate (ten days mean value of temperature, precipitation, relative humidity, and cloudiness), atmospheric CO_2 concentration, and

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201104006); 国家科技支撑计划课题(2012BAD22B01)资助

收稿日期: 2012-11-19; 修订日期: 2013-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuefgu@163.com

soil and vegetation distribution at a spatial resolution of 0.1° . Using the climate, vegetation and soil data, firstly, we ran the model with the average climate data from 1954 to 2010 until an ecological equilibrium was reached, then conducted dynamic simulations with climate data at a time-step of ten days from 1954 to 2010. Also, the correlation coefficients between soil HR and climate variables were calculated to analyze the response of soil heterotrophic respiration to climate change. To achieve the results, various kinds of computer software were used, such as ANUSPLIN4.1, Fortran 90, Arcgis 9.3, SPSS18.0. The results showed that: (1) The mean values of soil HR density was $422 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ during the period of 1954—2010 in alpine area of southwestern China. The soil HR showed a decreasing trend from southeast to northwest and had significant positive correlation with both annual mean temperature ($r = 0.721, P < 0.01$) and annual total precipitation ($r = 0.564, P < 0.01$). (2) Total annual soil HR showed an increasing trend with the rate of 0.710 Tg C/a ($P < 0.05$), and varied between 197 and 251 Tg C/a . The increasing rate was $1.621, 1.496$ and $1.055 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$ in grassland, evergreen coniferous forest and evergreen broad-leaved forest ($P < 0.01$), which were three main vegetation types in alpine area of southwestern China, respectively. (3) Annual variation of soil HR was mainly influenced by temperature. The temperature sensitivity of soil HR (Q_{10}) in the high-elevation northwestern areas was higher than that in the low-elevation southeastern areas, and it is $2.35, 2.34$ and 1.93 in grassland, evergreen coniferous forest and evergreen broad-leaved forest in this area, respectively.

Soil heterotrophic respiration is an extremely complex process involving a variety of biological and non-biological factors. Climate and vegetation changed with topography and high space heterogeneity existed in alpine area of southwestern China. For these reasons, we suggest that the model resolution should be improved and validation of the simulation result should be strengthened in future to reduce uncertainty.

Key Words: heterotrophic respiration; alpine area; climate change; CEVSA model

土壤呼吸是指土壤向大气释放 CO_2 的过程, 主要由微生物氧化有机物和根系呼吸产生, 另有极少部分来自于土壤动物的呼吸和化学氧化^[1-2]。土壤呼吸为仅次于总初级生产力的陆地生态系统和大气之间的第二大碳通量, 约为 $64\text{—}100 \text{ PgC}^{[2-5]}$, 土壤呼吸很小的变化会引起大气 CO_2 浓度相当大的改变, 与全球气候变化紧密相关^[3]。

土壤呼吸中最重要的组成部分为自养呼吸和异养呼吸, 自养呼吸主要与植物的生产力以及有机物对根系的供应情况有关, 而异养呼吸过程则与土壤碳储量和养分动态有关, 二者受不同的生物和非生物因素影响, 对气候变化的响应可能不同^[6-8], 因此在全球变暖情景下土壤呼吸的变化很大程度上取决于自养呼吸和异养呼吸的相对贡献率^[9]。然而, 现有的观测方法, 很难将自养呼吸和异养呼吸区分开^[10], 大部分关于土壤呼吸的研究并未将这两个过程分开考虑^[11], 因此进一步分别研究自养呼吸和异养呼吸的空间分布及对气候变化的响应具有重要意义。

土壤异养呼吸(HR)主要指土壤中微生物分解有机质释放 CO_2 的过程, 土壤异养呼吸与净初级生产力的差值决定着生态系统碳源汇状态^[12-13]。土壤异养呼吸是一个复杂的生态过程, 受温度、湿度、植被类型、土壤性质等多种因素影响, 具有强烈的时空变异性。HR 在空间分布上存在地域差异性, 周涛等应用生态系统碳平衡方程以及净初级生产力和气候资料得出中国区域土壤温度为 0°C 时的土壤异养呼吸量分布, 总体上是东南和东北地区较高, 西北地区较低^[12]。在时间尺度上 HR 主要呈增加趋势, Cao 等应用(CEVSA)模型得出我国 1981—1998 年 HR 变动范围为 $2.89\text{—}3.21 \text{ Gt C}$, 且大部分地区呈增加趋势^[14]; 孙国栋利用动态植被模型(LPJ DGVM)得出类似结论, 并进一步指出温带草本植物相对于其他植被功能类型线性增加趋势最为显著^[15]。Wang 等通过对搜集的文献数据分析表明, 在全球尺度上森林生态系统的 HR 与年平均温度及年降水总量均为正相关^[16], 而通过模型对中国区域的研究表明, HR 的年际变化总体上同温度正相关, 而与降水量则相关性不显著, 但不同地区对温度、降水响应情况具有差异性^[14]。关于植被类型对土壤呼吸的影响较多, 包

括不同植被类型土壤呼吸量^[16-17]及温度敏感性差异^[4,11],然而关于植被类型对异养呼吸影响的研究相对缺乏。

西南高山地区位于“世界第三极”青藏高原东南边缘,高山峡谷地貌,其显著的气候垂直分异、不同发育阶段的土壤和植被,致使植物物候、生长、生殖与生理对温度和 CO₂ 浓度的变化都给予极强的反馈,对全球气候变化具有重要的调节和指示作用^[18-21],是研究全球气候变化响应的理想区域。本文应用高分辨率的气候数据和生态系统过程模型估算 1954—2010 年期间西南高山地区土壤异养呼吸,并分析土壤异养呼吸分布格局及其对气候变化的响应。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究地区概况

本文采用《中国森林》的林区划分方法,西南高山地区为我国第二大天然林区,地理范围北部西接青藏高原,北侧及东侧与黄土高原相接壤,东侧南段与四川盆地分界,南界东段与云贵高原相接,西南段为国境线。西南高山地区作为中国森林区划一个独立的 I 级区,向下又分为 4 个 II 级区,从北到南依次是洮河白龙江云杉冷杉林区、岷江冷杉林区、大渡河雅砻江金沙江云杉冷杉林区,藏东南云杉冷杉林区^[22](图 1)。本研究中,统计的西南高山地区总面积为 $5.19 \times 10^5 \text{ km}^2$,总的地势是西北高、向东南倾斜,主要为高山峡谷地貌,年平均气温约为 5—10 °C,年降水量约为 600—1000 mm,温度及降水各地段差异较大。高山峡谷地貌孕育了该区复杂的植被类型,主要森林类型为云杉林及冷杉林,低海拔处有阔叶林,位置偏北降水量较少的洮河林区和白龙江林区主要是落叶阔叶林,大渡河向西到金沙江流域及雅鲁藏布江流域海拔较低处有常绿阔叶林分布。林下灌木丰富。林线以上常有高山灌丛分布,再以上为高山草甸或高山草原。

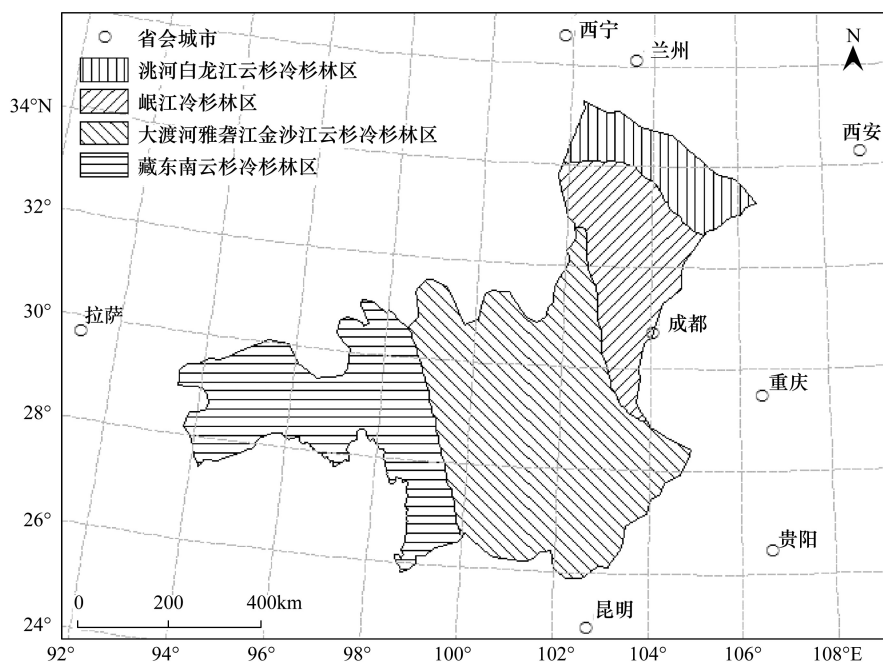


图 1 西南高山地区地理位置

Fig. 1 The location of alpine area of southwestern China

1.2 数据来源

本研究中,CEVSA 模型所需的气象数据(10d 平均温度,降水量,相对湿度和云量)来自国家气象信息中心,为 1954—2010 年全国约 756 个台站的旬观测数据,应用 ANUSPLIN 软件进行内插使其分辨率为 0.1°作为模型气象输入数据。大气 CO₂ 浓度资料来自于美国夏威夷 Mauna Loa 观测所(<http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/maunaloa-co2/maunaloa.co2>)。土壤类型和质地资料取自 1:100 万土壤类型图和第二次土壤普查数据,并使

之匹配于气候数据的空间分辨率。植被数据来源于 <http://www-gem.jrc.it/glc2000>, 是基于 2000 年的 spot 影像制作的 1 km 分辨率的土地覆盖分类数据, 在此基础上进行了插值重采样, 获得了 0.1° 分辨率的植被数据。

1.3 模型介绍

CEVSA 模型是一个基于生理生态过程模拟植物-土壤-大气系统能量交换和水碳氮耦合循环的生物地球化学循环模型^[23-25]。CEVSA 模型通过 3 个子模型描述这些过程及其与各种环境变量的相互作用: ①估算植物-土壤-大气之间水热交换、土壤含水量和气孔传导等过程的生物物理子模型; ②计算植物光合作用、呼吸作用、氮吸收速率、叶面积以及碳氮在植物各器官之间分配、积累、周转和凋落物产生的植物生理生长子模型; ③估算土壤有机质分解与转化和有机氮矿化等过程的土壤碳氮转化子模型^[26]。CEVSA 模型已经在全球和中国区域应用于研究陆地生态系统碳循环对气候变化的响应^[14, 24-25, 27-30]。

CEVSA 模型把土壤有机物质分为茎叶凋落物、根系凋落物、土壤微生物、慢和惰性碳库等 8 个碳库, 各个碳库有其特定的分解速率, 并因土壤温度、湿度、氮的有效性、土壤质地和凋落物质量(木质素与氮的比值)而异^[24-25, 28]。土壤异养呼吸是各个碳库微生物分解损失的气体碳之和, 土壤有机碳总储量(SOC)的变化是总凋落物量(LT)与呼吸损失之差。

1.4 模型运行与验证

在模拟过程中, 首先应用 1954—2010 平均气候数据将模型运行至生态系统平衡态, 即各个状态变量如植被、土壤碳贮量以及土壤含水量等年际变化量小于 0.1%, 且净初级生产力(NPP)、LT 分别与 HR 相等, 然后再用 1954—2010 每 10 d 气候数据驱动模型来进行动态模拟, 并反复运行模型以消除假定的生态系统状态变量的初始值(即平衡态假设)对模拟结果的影响, 之后即得到最终模拟结果。

CEVSA 模型应用的生物学和生态学原理、计算方程及参数均取自大量的实验室试验和野外试验观测。该模型曾应用叶片或植株生理试验、样点初级生产力观测和遥感反演数据进行了验证, 模型估算的 NPP、叶面积指数及植被和土壤中的碳贮量与实地调查和测定所得的实际值有很好的-致性^[23-25]。从 20 世纪 90 年代中期以后, 大型环境控制试验和涡度相关技术的应用为模型的检验测试提供了连续、长期的生态系统尺度碳通量观测数据^[31-32]。顾峰雪等应用涡度相关通量观测数据对 CEVSA 模型的验证和评价表明, CEVSA 模型较好地模拟了不同类型生态系统水碳通量的动态特征及其对气候变化的响应^[26]。

1.5 数据分析

基于 CEVSA 模型完成 1954—2010 年全国 0.1° 空间分辨率的模拟后, 提取西南高山地区的输入和输出数据加以分析。相关性分析采用 Pearson 相关系数法, 对 CEVSA 模型估算出的 1954—2010 年土壤异养呼吸分别与年平均温度、年降水量数据逐点计算相关系数, 得到 HR 与温度、降水的相关系数图, 然后设置 0.05、0.01 两个显著性水平对相关系数进行分类。HR 年际变化趋势的分析采用线性趋势倾向率方法^[33-34], 在研究区域内逐点进行线性回归, 最小二乘法拟合得到的一元线性方程斜率即为趋势倾向率, 并用相关系数检验法来确定变化是否显著^[35-38], 同样设置 0.05、0.01 两个显著性水平对相关系数进行分类, 查相关系数临界值得 $r_{0.05}=0.261$, $r_{0.01}=0.339$ 。

2 结果

2.1 土壤异养呼吸空间分布

西南高山地区 1954—2010 平均土壤异养呼吸 $422 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从图 2 可以 HR 随海拔由东南向西北递减, 其中研究区域内 HR 高值区主要位于四川平武、都江堰、攀枝花等地区 ($>500 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 海拔多在 1000 m 左右; 低值区 ($<300 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 主要为甘肃玛曲、四川西部红原、稻城和西藏芒康等地, 这些地区的海拔多在 3000 m 以上。西南高山地区 HR 最高的植被覆盖类型为耕作和管理区 ($659 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 最低的为定期水淹灌丛/草地 ($295 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) (表 1)。HR 的空间分布与海拔显著负相关 ($r=-0.681$, $P<0.01$), 而与温度、降水均显著正相关, 相关系数分别为 0.721 ($P<0.01$) 和 0.564 ($P<0.01$)。

2.2 土壤异养呼吸时间变化动态

2.2.1 土壤异养呼吸年际变化趋势

西南高山地区年 HR 总量较大的植被类型为常绿针叶林和草地,分别为 65 Tg C/a 和 76Tg C/a,这两种植被类型分别占林区面积的 31.2%、35.5%(表 1)。西南高山地区 1954—2010 年土壤异养呼吸变动区间为 197—251 Tg C/a,增加趋势显著($P<0.05$),平均每年增加 0.710 Tg C(图 3)。

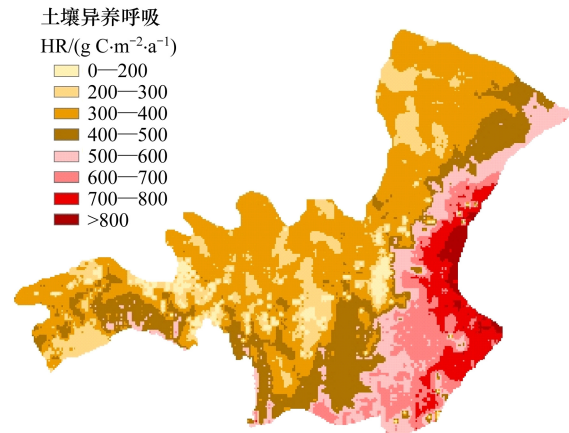


图 2 研究区域 1954—2010 年均土壤异养呼吸空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of mean annual heterotrophic respiration during the period of 1954—2010 in alpine area of southwestern China

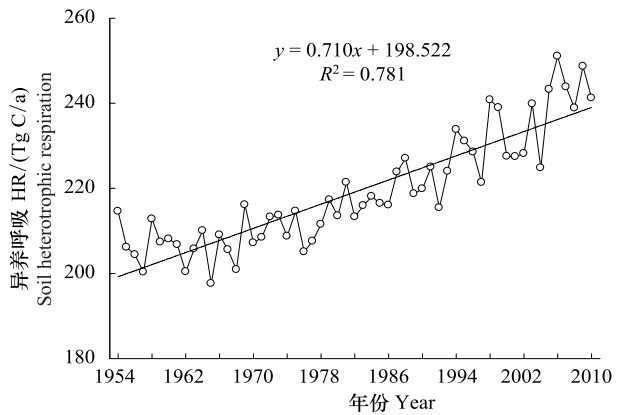


图 3 研究时段内西南高山地区年土壤异养呼吸时间动态
Fig. 3 Interannual variations in annual heterotrophic respiration during the period of 1954—2010 in alpine area of southwestern China

表 1 西南高山地区 1954—2010 年不同植被类型 57a HR 均值、HR 趋势倾向率及其与温度、降水相关系数
Table 1 57-year annual mean HR (Soil heterotrophic respiration), HR tendency rate and its correlation coefficient with mean annual temperature and annual precipitation of different vegetation types during the period 1954—2010 in alpine area of southwestern China

植被类型 Vegetation type	面积百分比 Area ratio/%	单位面积 HR HR in unit area /(g C·m ⁻² ·a ⁻¹)	HR 总量 Total HR /(Tg C/a)	趋势倾向率 Tendency rate /(g C·m ⁻² ·a ⁻²)	HR 与温度 相关系数	HR 与降水量 相关系数
常绿阔叶林	15.3	464	36.9	1.055 **	0.378 **	0.04
落叶阔叶林(郁闭)	1.04	491	2.67	1.385 **	0.338 *	-0.371 **
常绿针叶林	31.2	401	65.0	1.496 **	0.875 **	-0.090
林木与其它天然植被嵌合区	1.95	591	5.99	1.006 **	-0.029	-0.028
常绿灌丛	3.30	525	9.01	1.402 **	-0.225	-0.083
落叶灌丛	0.02	310	0.03	1.197 **	-0.408 **	0.047
草地	35.5	412	76.1	1.621 **	0.943 **	0.022
稀疏草地/稀疏灌丛	0.14	359	0.26	0.898 **	0.731 **	-0.042
定期水淹灌丛/草地	0.99	295	1.51	0.355 **	0.707 **	0.077
耕作和管理区	4.99	659	17.1	0.853 **	0.342 **	-0.213
农田、林区与其它天然植被嵌合区	2.01	440	4.60	1.768 **	0.200	0.253
裸地	0.21	0	0.00	—	—	—
水体	1.62	0	0.00	—	—	—
雪和冰	1.74	0	0.00	—	—	—

常绿阔叶林 Tree Cover, broadleaved, evergreen;落叶阔叶林(郁闭)Tree Cover, broadleaved, deciduous, closed;常绿针叶林 Tree Cover, needle-leaved, evergreen;林木与其它天然植被嵌合区 Mosaic; Tree cover / Other natural vegetation;常绿灌丛 Shrub Cover, closed-open, evergreen;落叶灌丛 Shrub Cover, closed-open, deciduous;草地 Herbaceous Cover, closed-open;稀疏草地/稀疏灌丛 Sparse Herbaceous or sparse Shrub Cover;定期水淹灌丛/草地 Regularly flooded Shrub and/or Herbaceous Cover;耕作和管理区 Cultivated and managed areas;农田、林区与其它天然植被嵌合区 Mosaic; Cropland / Tree Cover / Other natural vegetation;裸地 Bare Areas;水体 Water Bodies;雪和冰 Snow and Ice;HR 与温度相关系数,Correlation coefficient between heterotrophic respiration and mean annual temperature;HR 与降水量相关系数 Correlation coefficient between heterotrophic respiration and annual precipitation; * $P<0.05$; ** $P<0.01$

研究时段内,林区温度上升趋势显著($P<0.05$),趋势倾向率为 0.08 °C/10a,降水量下降趋势显著($P<0.01$),趋势倾向率为 18.3 mm/10a。年 HR 总量与温度呈显著正相关($r=0.629, P<0.01$),与降水量负相关

($r = -0.369, P < 0.01$), HR 的增长是由温度上升和降水量下降共同造成的,但是温度升高所起的作用更大一些,高温少雨年 2006、2009 年为 HR 最高的两年,然而高温多雨年(如 1998、1999 年),HR 同样较高,说明 HR 主要受温度影响(图 4)。

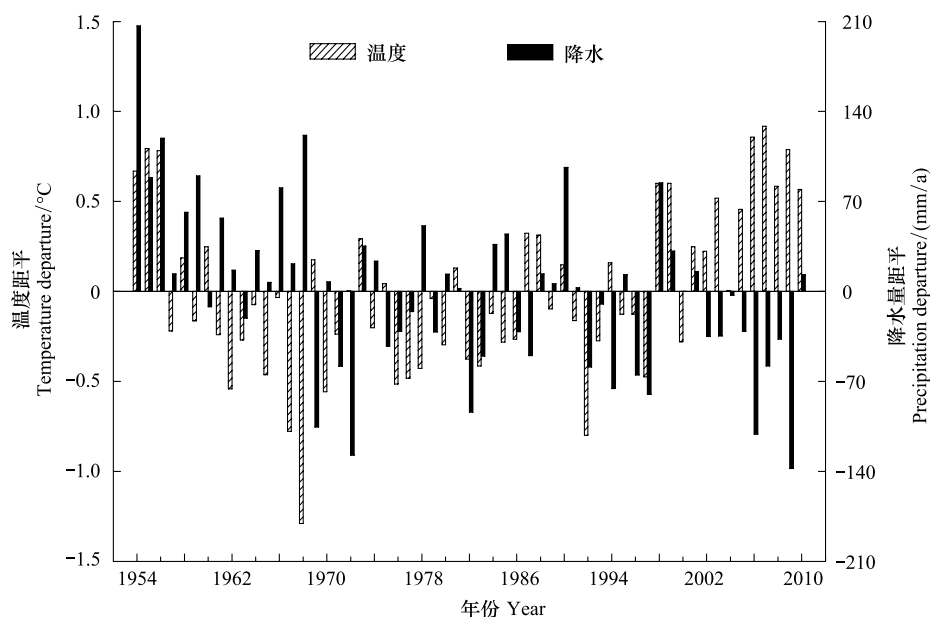


图 4 西南高山地区 1954—2010 年年平均温度和年降水量距平变化

Fig. 4 Changes in annual mean annual temperature departure and annual precipitation departure during the period of 1954—2010 in alpine area of southwestern China

2.2.2 土壤异养呼吸年变化趋势空间分布

如图 5 所示,西南高山地区 HR 主要呈增加趋势,上升显著地区占研究区域的 64.9% ($P < 0.05$),其中上升较快的地区主要为大渡河雅砻江金沙江云杉冷杉林区的草地覆盖地区($>2.0 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$),而下降显著的区域仅占 7.6% ($P < 0.05$),且主要位于研究区域东部的低海拔地区及其他少数地区。西南高山地区 HR 上升最快的植被类型为草地($1.621 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$)和农田、林区与其它天然植被嵌合区($1.768 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$),而最慢的为定期水淹灌丛/草地($0.355 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$)(表 1)。

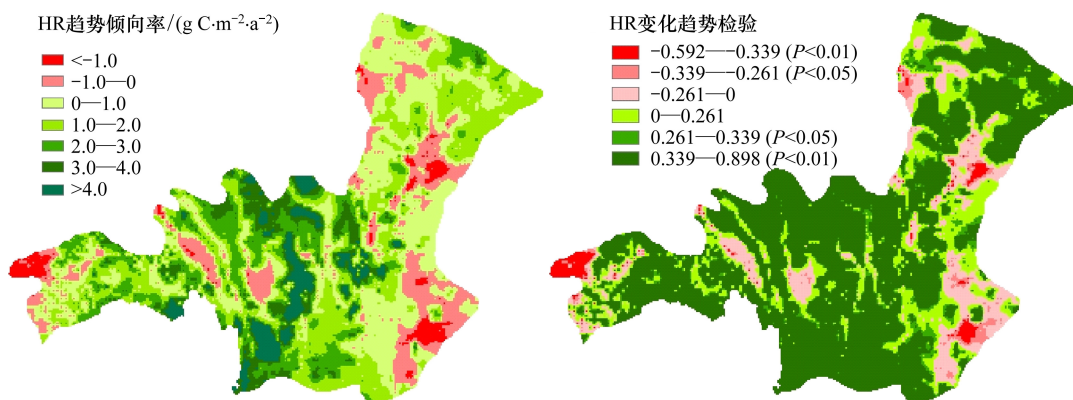


图 5 西南高山地区 1954—2010 年土壤异养呼吸(HR)变化趋势及其相关系数法显著性检验

Fig. 5 Trend of annual heterotrophic respiration changes, and its significance test with the correlation coefficient method during the period 1954—2010 in alpine area of southwestern China

如图 6 所示,HR 与温度主要为正相关,除藏东南雅鲁藏布江流域少部分地区与温度负相关外,其他地区

均为正相关,通过显著性检验占全区面积的 92.7% ($P < 0.05$),而 HR 与降水相关性不如温度显著,只有部分地区通过了检验,但大部分地区与降水量相关系数为负值(66.0%),包括洮河白龙江云杉冷杉林区的几乎全部地区、岷江冷杉林区和大渡河雅砻江金沙江云杉冷杉林区的大部分地区及藏东南云杉冷杉林区的小部分地区。西南高山地区大部分植被类型 HR 与温度为正相关,其中草地和常绿针叶林相关性最高,相关系数分别为 0.943 ($P < 0.01$)、0.875 ($P < 0.01$),而 HR 与降水量相关性分析只有落叶阔叶林(郁闭)通过了检验($r = -0.371, P < 0.01$) (表 1)。

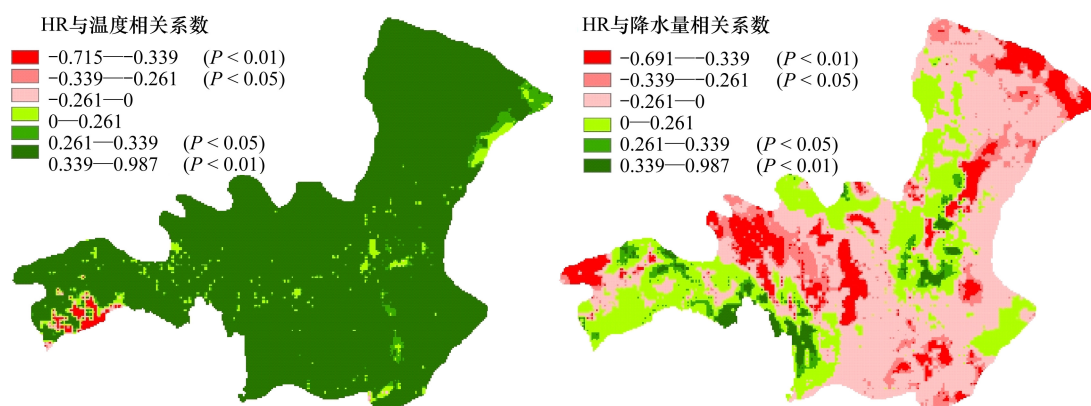


图 6 西南高山地区 1954—2010 年土壤年异养呼吸与年平均温度相关系数空间分布,异养呼吸和年降水量相关系数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of correlation coefficient between annual heterotrophic respiration and mean annual temperature, correlation coefficient between annual heterotrophic respiration and annual precipitation during the period of 1954—2010 in alpine area of southwestern China

3 讨论

3.1 西南高山地区土壤异养呼吸的空间分布特征

西南高山地区位于青藏高原东南缘,高山峡谷地貌,总的地势是西北高,向东南倾斜,由于纬度北移和地势抬升,年平均气温、降水量均自东南向西北逐次降低(图 7),相应的植被类型则由落叶、常绿阔叶林和常绿针叶林过渡高山、亚高山草甸,导致土壤异养呼吸分布有其自身的规律,即随海拔高度的升高自东南向西北递减。

温度是影响土壤呼吸最主要的环境变量^[2],然而在干旱和半干旱地区,由于降水强烈影响植被的光合作用和土壤微生物的活动,降水成为影响土壤呼吸第二大非生物变量^[39]。在空间分布上,西南高山地区土壤异养呼吸与温度、降水量均正相关,然而由于研究地区降水量丰富,温度相对于降水量而言对 HR 的空间分布作用更大一些,西南高山地区土壤 HR 空间分布与温度空间分布格局高度一致(图 7)。

土壤有机质(SOC)作为土壤呼吸的原料会直接影响着土壤呼吸量^[40],然而研究地区 HR 与 SOC 相关性微弱($r = 0.028, P < 0.01$),而与凋落物量($r = 0.995, P < 0.01$)高度正相关,这可能是由于 HR 主要来自新输入的碳而不是分解已存储的碳^[5,41]。土壤异养呼吸与凋落物量之间的这一正相关关系与全球及区域尺度的研究结果一致^[41-42]。

土壤呼吸同样受植被类型影响,不同植被类型间土壤呼吸具有差异性^[1-2,43]。西南高山地区主要植被类型为草地、常绿针叶林和常绿阔叶林,共占林区面积的 82.0%,其中常绿阔叶林 HR 最高($464 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),其次为草地植被类型($412 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),而常绿针叶林最小($401 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。多数研究表明草地土壤呼吸量比相邻地区的森林土壤呼吸量要高,因为草地植被将大部分光合产物都分配给地下器官^[17,44-45],然而西南高山地区草地土壤 HR 量并未明显高于森林植被,这是由于研究区域草地主要分布在西北部的高海拔低温地区,受低温影响 HR 较低。西南高山地区常绿阔叶林土壤 HR 量明显高于常绿针叶林,Raich 等指出由于针叶林土壤碳循环速度要低于阔叶林土壤,所以阔叶林的呼吸量要高于针叶林的呼吸量,且认为土壤呼吸速率主

要由气候和基质因素决定,植被类型只是一个间接影响因素^[17]。

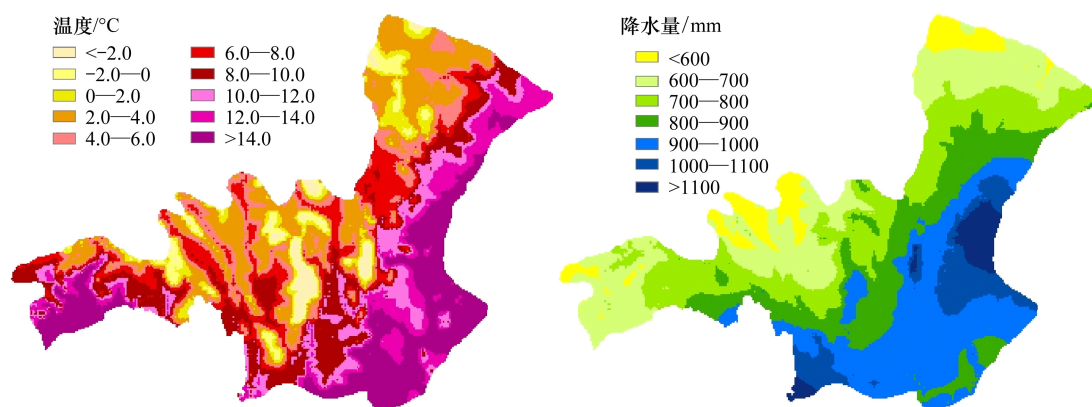


图7 研究区域 1954—2010 年平均温度和年降水量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of mean annual temperature and annual precipitation during the period 1954—2010 in alpine area of southwest China

3.2 西南高山地区气候变化对土壤异养呼吸的影响

西南高山地区 HR 在 1954—2010 时间段上升趋势显著 ($P < 0.05$), 这与全球尺度及中国区域土壤呼吸的增加趋势一致^[5,14-15]。土壤呼吸速率的变化受温度与水分共同调控^[17,46]。温度升高一般会促进土壤 CO_2 的排放^[5,14], 在年际尺度上, 西南高山地区大部分地区 HR 与温度正相关, 而与降水量相关性并不显著, 研究地区 HR 年际变化主要受温度影响。图 8 为基于气温的年 HR 温度敏感系数分布图, Q_{10} 由 van't Hoff 公式计算得来 ($\text{HR} = \alpha \times e^{\beta T}$; $Q_{10} = e^{10\beta}$)^[4,16,47], 表示年均气温每增加 10°C , 年异养呼吸量增加的倍数^[48]。西南高山地区 Q_{10} 呈现出和温度分布相反的格局, 由东南向西北逐渐增加, 即温度较低的地区土壤异养呼吸 Q_{10} 比温度较高的地区大。Kirschbaum 搜集采用室内培养方法的文献数据, 发现在温度较低时的土壤异养呼吸温度敏感性高于温度较高时的土壤异养呼吸温度敏感性, 在 0°C 时, Q_{10} 达到 8, 而在 10°C 时, Q_{10} 为 4.5^[49]。Chen 和 Tian 亦报道全球植被土壤呼吸 Q_{10} 值随温度的降低从热带/亚热带、温带、寒带而增大^[50]。由此可见, 温度上升对寒冷地区土壤呼吸影响更大, 这是由于在这些地区低温一定程度上限制了植被和微生物的活动。Zheng 等通过对中国地区土壤呼吸的观测结果和文献资料的分析同样表明, 在温度较低的地区土壤呼吸 Q_{10} 较高, 且认为 Q_{10} 的大小与土壤有机碳储量有关, 土壤惰性碳库是土壤呼吸的重要来源, 较高的土壤有机碳储量预示着较高的潜在土壤呼吸, 而土壤有机碳储量较高的地区 Q_{10} 较高^[4]。西南高山地区土壤有机质的空间分布与温度负相关 ($r = -0.447$, $P < 0.01$), 西北地区有机质储量高于东南地区, 亦符合有机质含量高的地区 Q_{10} 较高这一规律。

西南高山地区两种主要森林类型常绿针叶林和常绿阔叶林土壤异养呼吸 Q_{10} 分别为 2.34 和 1.93, 而 Peng 等对中国区域基于土壤温度的土壤呼吸 Q_{10} 的研究表明, 常绿针叶林为 2.28, 而常绿阔叶林 1.81, 与本研究结果基本一致^[11]。再者由于气温波动比土壤温度要大, 因此相同时空内基于大气温度的 Q_{10} 要低于基于土壤温度的 Q_{10} ^[3,16], 且土壤呼吸 (同时包括自养呼吸与异养呼吸) 与 HR 对温度响应也并不相同, 多数研究表明异养呼吸的 Q_{10} 低于自养呼吸^[6,16,51], 因此综合来看西南高山地区常绿针叶林和常绿阔叶林土壤异养呼吸对温度敏感程度要高于全国尺度。Peng 等表明 Q_{10} 最高的植被类型为亚高山草甸和苔原 (3.05—1.06), 而本文得出草地的 Q_{10} 为 2.35, 同样也是各植被类型中最高的^[11]。不同植被类型 Q_{10} 存在差异, 这是和植被生长环境的温度相关的, 较冷地区植被的 Q_{10} 相对较高, 研究地区内草地植被平均温度为 5.9°C , 而常绿针叶林和常绿阔叶林分别为 7.5°C 和 10.7°C 。Zheng 等则认为植被类型对土壤呼吸 Q_{10} 的影响可以由不同生态系统土壤微生物和土壤有机质组分具有差异性来解释, 森林在演替过程中土壤有机质中的惰性有机碳是不断

增加的,若是惰性有机碳不如活性有机碳对温度敏感这一结论是正确的话^[52-53],那么就可以进一步解释常绿阔叶林土壤呼吸 Q_{10} 相对于常绿针叶林较低这一现象^[4]。

本研究仍存在一定的不确定性。异养呼吸是一个复杂的生态过程,涉及多种生物和非生物因子。再者,西南高山地区地形地貌复杂,温度、降水及植被类型空间差异较大。在未来的研究中,应进一步提高模型分辨率,考虑土地利用、土地覆被变化等对生态系统的影响,且加强对西南高山地区模拟结果的验证工作。

4 结论

西南高山地区位于青藏高原东南边缘,高山峡谷地貌、水热条件空间差异大,使本地区土壤异养呼吸分布格局及对气候变化的响应有其自身的特点。

(1)在空间分布上,西南高山地区土壤异养呼吸随海拔自东南向西北减少,土壤异养呼吸空间分布与温度、降水均正相关。

(2)在年际尺度上,西南高山地区土壤异养呼吸在 1954—2010 时间段内增加趋势显著,3 种主要植被类型中,草地增加速度最快,其次为常绿针叶林和常绿阔叶林。

(3)西南高山地区绝大部分地区土壤异养呼吸年际变化与温度正相关,而与降水量相关性不显著,且西北部较东南部对温度变化更为敏感,主要植被类型异养呼吸温度敏感系数(Q_{10})从大到小依次是草地、常绿针叶林和常绿阔叶林。

References:

- [1] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1977, 8(1): 51-81.
- [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] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [4] Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, Wang Y S, Sun X M, Wang Y H. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1531-1540.
- [5] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [6] Epron D, Le Dantec V, Dufrene E, Granier A. Seasonal dynamics of soil carbon dioxide efflux and simulated rhizosphere respiration in a beech forest. *Tree Physiology*, 2001, 21(2/3): 145-152.
- [7] Bhupinderpal-Singh, Nordgren A, Löfvenius M O, Höglberg M N, Mellander P E, Höglberg P. Tree root and soil heterotrophic respiration as revealed by girdling of boreal Scots pine forest: extending observations beyond the first year. *Plant, Cell & Environment*, 2003, 26(8): 1287-1296.
- [8] Binkley D, Stape J L, Takahashi E N, Ryan M G. Tree-girdling to separate root and heterotrophic respiration in two *Eucalyptus* stands in Brazil. *Oecologia*, 2006, 148(3): 447-454.
- [9] Zhou X H, Wan S Q, Luo Y Q. Source components and interannual variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, 13(4): 761-775.
- [10] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [11] Peng S S, Piao S L, Wang T, Sun J Y, Shen Z H. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 1008-1014.
- [12] Zhou T, Shi P J, Sun R, Wang S Q. The impacts of climate change on net ecosystem production in China. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 357-365.
- [13] Fan Z P, Wang H, Deng D Z, Sun X K, Gao J G, Zeng D H. Measurement methods of soil heterotrophic respiration and key factors affecting the temperature sensitivity of the soil heterotrophic respiration. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7): 1221-1226.

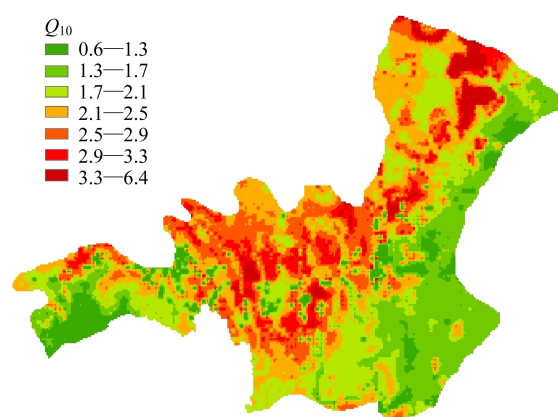


图8 研究区域 1954—2010 Q_{10} (土壤异养呼吸对气温的敏感性) 空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution of Q_{10} (air temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration) during the period 1954—2010 in alpine area of southwestern China

- [14] Cao M K, Prince S D, Li K R, Tao B, Small J, Shao X M. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 536-546.
- [15] Sun G D. Simulation of potential vegetation distribution and estimation of carbon flux in China from 1981 to 1998 with LPJ dynamic global vegetation model. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(4): 341-351.
- [16] Wang W, Chen W L, Wang S P. Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components: global patterns and responses to temperature and precipitation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(8): 1236-1244.
- [17] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [18] Gu X P, Huang M, Jing J J, Wu Z P. The influence of climate change on vegetation net primary productivity in Southwestern China during recent 20 years period. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(2): 251-259.
- [19] Tang X. Estimation Carbon Storage of Forest Vegetation and Spatial Distribution in Sichuan Province [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2007.
- [20] Zhang Y D, Liu S R, Wei X H, Liu J T, Zhang G B. Potential impact of Afforestation on Water Yield in the Subalpine Region of Southwestern China. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1144-1153.
- [21] Liu B, Yang W Q, Wu F Z. Advances in the subalpine forest ecosystem processes. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(16): 4476-4483.
- [22] Chinese Forest Editorial Committee. Chinese Forest (Volume one) [M]. Beijing: China Forestry Press, 1997: 486-498.
- [23] Woodward F I, Smith T M, Emanuel W R. A global land primary productivity and phytogeography model. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(4): 471-490.
- [24] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [25] Cao M K, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 185-198.
- [26] Gu F X, Cao M K, Yu G R, Tao B, Wen X F, Liu Y F, Zhang L M. Modeling carbon exchange in different forest ecosystems by CEVSA model: comparison with eddy covariance measurements. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(3): 313-321.
- [27] Cao M K, Zhang Q F, Shugart H H. Dynamic responses of African ecosystem carbon cycling to climate change. *Climate Research*, 2001, 17(2): 183-193.
- [28] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Carbon storage of vegetation and soil in China. *Science in China (Series D)*, 2003, 47(1): 49-57.
- [29] Tao B, Li K R, Shao X M, Cao M K. Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystems in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 372-380.
- [30] Tao B, Cao M K, Li K R, Gu F X, Ji J J, Huang M, Zhang L M. Spatial patterns of terrestrial net ecosystem productivity in China during 1981—2000. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2006, 50(5): 745-753.
- [31] Running S W, Baldocchi D D, Turner D P, Gower S T, Bakwin P S, Hibbard K A. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 108-127.
- [32] Baldocchi D D, Wilson K B. Modeling CO₂ and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales. *Ecological Modelling*, 2001, 142(1/2): 155-184.
- [33] Cai F, Zhang S J, Yu G R, Zhu Q L, Liu X A. Research of spatial-temporal evolution characters of mean air temperature in China in recent 50 years based on spatialization technique. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(6): 1168-1175.
- [34] Yao Y B, Yang J H, Wang R Y, Lu D R. Change feature of net primary productivity of natural vegetation and its impact factors over the source region of the Yangtze River in recent 50 years. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(11): 2521-2528.
- [35] He X Q, Liu W Q. Analysis of Applied Regression. Beijing: Chinese People's University Press, 2001: 18-40.
- [36] Piao S L, Fang J Y. Terrestrial net primary production and its spatio-temporal patterns in Qinghai-Xizang Plateau, China during 1982—1999. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 373-380.
- [37] Yang Y L. Temporal and Spatial Analysis of NDVI Variation and Correlation Analysis Between NDVI and Temperature and Rainfall in the Natural Grassland of Qinghai Province [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2008.
- [38] Du J Q, Shu J M, Zhang L B, Guo Y. Responses of vegetation to climate change in the headwaters of China's Yellow River Basin based on zoning of dry and wet climate. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(11): 1192-1201.
- [39] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains. *Plant Soil*, 2001, 237(1): 15-23.
- [40] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, Taylor A F S, Ekblad A, Höglberg 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.
- [41] Bond-Lamberty B, Wang C K, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1756-1766.
- [42] Chen G S, Yang Y S, Lü P P, Zhang Y P, Qian X L. Regional patterns of soil respiration in China's forests. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1748-1761.
- [43] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review*, 1977, 43(4): 449-528.

- [44] Yang Y S, Dong B, Xie J S, Chen G S, Gao R, Li L, Wang X G, Guo J F. Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 583-591.
- [45] Caquet B, De Grandcourt A, Thongo M'Bou A, Epron D, Kinana A, André L S, Nouvellon Y. Soil carbon balance in a tropical grassland: Estimation of soil respiration and its partitioning using a semi-empirical model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 158-159: 71-79.
- [46] Qi Y, Xu M, Wu J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises. *Ecological Modelling*, 2002, 153(1/2): 131-142.
- [47] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Temperature sensitivity of soil respiration and its effecting factors in the different land use. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(11): 1537-1542.
- [48] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [49] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6): 753-760.
- [50] Chen H, Tian H Q. Does a general temperature-dependent Q_{10} model of soil respiration exist at biome and global scale? *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(11): 1288-1302.
- [51] 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.
- [52] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 2000, 404(6780): 858-861.
- [53] Thornley J H M, Cannell M G R. Soil carbon storage response to temperature: an hypothesis. *Annals of Botany*, 2001, 87(5): 591-598.

参考文献:

- [12] 周涛, 史培军, 孙睿, 王绍强. 气候变化对净生态系统生产力的影响. *地理学报*, 2004, 59(3): 357-365.
- [13] 范志平, 王红, 邓东周, 孙学凯, 高俊刚, 曾德慧. 土壤异养呼吸的测定及其温度敏感性影响因子. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1221-1226.
- [15] 孙国栋. LPJ 模型对 1981—1998 年中国区域潜在植被分布和碳通量的模拟. *气候与环境研究*, 2009, 14(4): 341-351.
- [18] 谷晓平, 黄玫, 季劲钧, 吴战平. 近 20 年气候变化对西南地区植被净初级生产力的影响. *自然资源学报*, 2007, 22(2): 251-259.
- [19] 唐宵. 四川森林植被碳储量估算及其空间分布特征 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2007.
- [21] 刘彬, 杨万勤, 吴福忠. 亚高山森林生态系统过程研究进展. *生态学报*, 2010, 30(16): 4476-4483.
- [22] 中国森林编辑委员会. 中国森林(第一卷). 北京: 中国林业出版社, 1997: 486-498.
- [26] 顾峰雪, 曹明奎, 于贵瑞, 陶波, 温学发, 刘允芬, 张雷明. 典型森林生态系统碳交换的机理模拟及其与观测的比较研究. *地球科学进展*, 2007, 22(3): 313-321.
- [28] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量. *中国科学 D 辑*, 2003, 33(1): 72-80.
- [29] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 曹明奎. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟. *地理学报*, 2003, 58(3): 372-380.
- [30] 陶波, 曹明奎, 李克让, 顾峰雪, 季劲钧, 黄玫, 张雷明. 1981—2000 年中国陆地净生态系统生产力空间格局及其变化. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 2006, 36(12): 1131-1139.
- [33] 蔡福, 张淑杰, 于贵瑞, 祝青林, 刘新安. 基于空间化技术对中国近 50 年平均气温时空演变特征的研究. *高原气象*, 2006, 25(6): 1168-1175.
- [34] 姚玉璧, 杨金虎, 王润元, 陆登荣. 50 年长江源区域植被净初级生产力及其影响因素变化特征. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2521-2528.
- [35] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析. 北京: 中国人民大学出版社, 2001: 18-40.
- [36] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 373-380.
- [37] 杨英莲. 青海省天然草地 NDVI 的时空化与气温和降水的关系分析 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [38] 杜加强, 舒俭民, 张林波, 郭杨. 黄河上游不同干湿气候区植被对气候变化的响应. *植物生态学报*, 2011, 35(11): 1192-1201.
- [42] 陈光水, 杨玉盛, 吕萍萍, 张亿萍, 钱小兰. 中国森林土壤呼吸模式. *生态学报*, 2008, 28(4): 1748-1761.
- [44] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 陈光水, 高人, 李灵, 王小国, 郭剑芬. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应. *生态学报*, 2004, 24(3): 583-591.
- [47] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析. *环境科学学报*, 2005, 25(11): 1537-1542.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33 ,No. 16 Aug. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Advances in theoretical issues of species distribution models LI Guoqing, LIU Changcheng, LIU Yuguang, et al (4827)
- A review on rare earth elements in farmland ecosystem JIN Shulan, HUANG Yizong (4836)
- A review on the mechanism of attachment and metamorphosis in barnacle cyprids ... RAO Xiaozhen, LIN Gang, XU Youqin (4846)
- Decision making in group living animals WANG Chengliang, WANG Xiaowei, QI Xiaoguang, et al (4857)

Autecology & Fundamentals

- Influence of monsoon's advancing, retreating and conversion on migrations of *Nilaparvata lugens* (Stål) in China
..... BAO Yunxuan, HUANG Jinying, XIE Xiaojin, et al (4864)
- Prey selection and feeding rate of sea stars *Asterias amurensis* and *Asterina pectinifera* on three bivalves
..... QI Zhanhui, WANG Jun, MAO Yuze, et al (4878)
- Habitat selection of Whooper Swan at Bayanbulak in Xinjiang of China DONG Chao, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (4885)
- The genetic structure of endemic plant *Pteroceltis tatarinowii* by ISSR markers
..... LI Xiaohong, ZHANG Hui, WANG Deyuan, et al (4892)
- Genetic analysis of salt tolerance of F_1 progenies between chrysanthemum and the intergeneric hybrid of chrysanthemum and
crossostephium XU Lili, CHEN Fadi, CHEN Sumei, et al (4902)
- Indicative effect of the anatomical structure of plant photosynthetic organ on WUE in desert region
..... ZHANG Haina, SU Peixi, LI Shanjia, et al (4909)
- Effects of water on photosynthesis in different age of tomato leaves CHEN Kaili, LI Jianming, HE Huiqiang, et al (4919)
- Photosynthesis-nitrogen relationship in evergreen and deciduous tree species at different altitudes on Mao'er Mountain, Guangxi
..... BAI Kundong, JIANG Debing, WAN Xianchong (4930)
- Effect of fertilization on the dynamic of soil N_2O fluxes in Chinese chestnut stands
..... ZHANG Jiaojiao, LI Yongfu, JIANG Peikun, et al (4939)
- Effects of long-term fertilization on aggregate dynamics and organic carbon and total nitrogen contents in a reddish paddy soil
..... LIU Xiyu, WANG Zhongqiang, ZHANG Xinyu, et al (4949)

Population, Community and Ecosystem

- Carbon storage of natural wetland ecosystem in Daxing'anling of China MU Changcheng, WANG Biao, LU Huicui, et al (4956)
- Monitoring the riparian vegetation cover after the Wenchuan earthquake along the Minjiang River valley based on multi-temporal
Landsat TM images; a case study of the Yingxiu-Wenchuan section XU Jiceng, TANG Bin, LU Tao (4966)
- A dynamic analysis of spatial distribution pattern of *Larix gmelinii* natural forest in Pangu farm under varying intensity of fire
disturbance NI Baolong, LIU Zhaogang (4975)
- Structure of macrozoobenthos in lakes along the Yangtze River and relationships with environmental characteristics
..... CAI Yongjiu, JIANG Jiahu, ZHANG Lu, et al (4985)
- The research on the age structure and sex ratio of *Niviventer confucianus* in Thousand Island Lake
..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (5000)
- Mathematical model of insect Logistic increasing and economic threshold based on sex pheromone trap
..... ZHAO Zhiguo, RONG Erhua, ZHAO Zhihong, et al (5008)
- Community composition and phototaxis of insects in tea plantations in Southern Jiangshu Province during late fall
..... ZHENG Yingcha, NIU Yuqun, CUI Guiling, et al (5017)
- Effect of agricultural land use types on soil mite communities in north China
..... HAN Xuemei, LI Dandan, LIANG Zian, et al (5026)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Exploring the space syntax under negative planning: a case study of landscape connectivity based on the behaviors of avian edge
species YANG Tianxiang, ZHANG Weiqian, FAN Zhengqiu, et al (5035)
- Temporal-spatial variation of heterotrophic respiration in alpine area of southwestern China
..... ZHANG Yuandong, PANG Rui, GU Fengxue, et al (5047)

- Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province ZHAO Mingsong, ZHANG Ganlin, LI Decheng, et al (5058)
- Spatial distribution and change of vegetation carbon in Northwest Guangxi, China on the basis of vegetation inventory data ZHANG Mingyang, LUO Weijian, LIU Huiyu, et al (5067)
- Resource and Industrial Ecology**
- Urban metabolism process based on emergy synthesis; a case study of Beijing LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin (5078)
- Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and matter element analysis ZHANG Rui, ZHENG Huawei, LIU Youzhao (5090)
- The effect of super absorbent polymer on the growth and nutrition absorption of *Festuca arundinacea* L. on an improved gangue matrix ZHAO Zhifeng, WANG Dongmei, ZHAO Tingning (5101)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- The effect of distance on the ecological conservation value; a case study of Sanjiang Plain Wetland AO Changlin, CHEN Jinting, JIAO Yang, et al (5109)
- Research Notes**
- Scaling effect on spatial variation of soil organic carbon in mountainous areas of Guangdong Province JIANG Chun, WU Zhifeng, QIAN Lexiang, et al (5118)
- The changes of hair length and pelage thermal insulation in captive female squirrel, *Sciurus vulgarize manchuricus*, during autumn molting period JING Pu, ZHANG Wei, HUA Yan, et al (5126)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任副主编 王克林

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 33 卷 第 16 期 (2013 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 16 (August, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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 90.00 元