

陆面模式中土壤呼吸的研究概况

张霞

中国科学院大气物理所东亚区域气候—环境重点实验室 北京 100029

摘要 土壤呼吸是陆地植被吸收的 CO_2 返回大气的基本途径, 土壤呼吸速度轻微变化也会引起大气中 CO_2 浓度的明显改变, 进而影响气候变化。陆面过程模式中更好地描述土壤呼吸过程对于预测未来气候变化是至关重要的。对于土壤呼吸的模拟研究, 介绍了经验模型和以过程为基础的机理模型, 以及国内外陆面过程模式中土壤呼吸的研究情况, 并讨论了土壤呼吸模式中需要改进的问题。

关键词 气候变化 陆面模式 土壤呼吸

文章编号 1006-9585 (2007) 05-0693-06 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

A Review of Soil Respiration in Land Surface Model

ZHANG Xia

*Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Template East Asia,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Soil respiration is the primary path by which CO_2 fixed by land plants returns to the atmosphere. Slight change in soil respiration rate leads to evident change in the concentration of CO_2 in the atmosphere and further affects the global climate change. Better representing soil respiration processes including microbial respiration and root respiration processes in land surface schemes could help improve the climate models' simulation to future climate. The soil respiration empirical model and processes-based model are introduced, and the investigations on simulation method of soil respiration processes in land surface schemes are reviewed. In conclusion, the issues that need to improve in soil respiration model are brought forward.

Key words climate change, land surface model, soil respiration

1 引言

全球碳循环与气候系统有着非常密切的关系, 大气 CO_2 浓度升高引起的温室效应是导致全球变暖的重要原因之一^[1]。大气 CO_2 浓度的波动取决于陆地和海洋生态系统与大气之间碳交换通量的变化, 全球气候变化也影响陆地和海洋生态系统碳循环^[2]。耦合碳循环的气候模式是目前气候模

式的发展方向^[3]。大气和陆地生态系统之间的碳交换是全球碳循环中重要的碳通量之一。目前, 陆地生态系统碳通量的观测研究在全球范围展开, 为分析地圈—生物圈—大气圈的相互作用, 评价陆地生态系统在全球碳循环中的作用提供了重要的数据基础^[4]。研究陆地生态系统碳循环机制及其对全球变化的响应, 是预测大气 CO_2 含量及气候变化的基础。因此, 作为气候系统模式的重要组成部分, 需要提高陆面过程模式对陆地生态系统碳循环的模拟能力。

收稿日期 2006-11-10 收到, 2007-06-02 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40605027 和 30590381-09

作者简介 张霞, 女, 1972 年出生, 博士, 助理研究员, 从事陆气相互作用和陆面过程模式发展的研究。E-mail: zhangx@tea. ac. cn

2 土壤呼吸与气候变化

陆地土壤有机碳库约 $1\ 500\ \text{Pg}$ ($1\ \text{Pg} = 1 \times 10^{15}\ \text{g}$)，是陆地生态系统的最大碳库^[5]，约占总量的 67%^[6]，是全球大气碳库 $750\ \text{Pg}$ 的两倍多^[7]。土壤碳库主要通过凋落物碳的输入和土壤呼吸的碳排放与其他碳库进行交换。全球土壤中碳贮量的增加将有助于缓和 CO_2 进一步人为释放，而土壤 CO_2 的释放则会显著加剧大气中 CO_2 浓度的升高。土壤呼吸是陆地植被吸收的 CO_2 返回大气的基本途径^[8]，全球土壤呼吸释放的 CO_2 大约为每年 $50 \sim 75\ \text{Pg}$ ，占陆地生态系统与大气之间碳交换总量的 $2/3$ ，占大气 CO_2 年输入量的 20% ~ 40%^[9]，比陆地生态系统净初级生产力吸收的碳量大 30% ~ 60%^[10]，也远远超过由于化石燃料燃烧每年向大气排放的 $5\ \text{Pg}$ ^[11]。所以，即使土壤呼吸轻微的变化也会引起大气中 CO_2 浓度的明显改变，进而影响气候变化^[12]。

土壤呼吸主要包括微生物对土壤有机质的分解和植被根呼吸。来自土壤有机质分解的 CO_2 在土壤 CO_2 总量中的比例在非生长季可达 100%，而在生长季根呼吸占总量的 30% ~ 60%^[13]。影响土壤呼吸速率的主要因素是土壤温度和湿度，在湿度适合条件下，土壤呼吸对温度的变化更敏感。试验研究证实，升高温度会加快土壤异养呼吸速度——主要是土壤有机碳的分解速度，向大气释放更多的 CO_2 ^[14,15]，例如，根据 Raich 和 Potter 的研究^[10]，在全球气温上升 $0.3\ ^\circ\text{C}$ 的前提下全球土壤呼吸量每年将增加 $2\ \text{Pg}$ 。

过去 25 年的观测数据显示冬季北半球高纬度地区气温出现了明显的变暖^[16]。许多研究表明，寒冷气候环境的土壤对气候变暖响应最大。由于土壤处于低温冻结的条件下，土壤呼吸速度很低，积累了大量不稳定的有机碳储存在土壤中^[17]。北部高纬度地区土壤含碳量占全球土壤碳库总量的 23% ~ 32%^[18]。气候变暖导致季节性冻土融化层增大，永久性冻土层退化，土壤水位下降，土壤有机质的分解速度加快，释放更多的 CO_2 进入大气^[19]。Oechel 等^[20] 和 Goulden 等^[21] 发现了一些北方森林和冻土地区由于气候变暖而导致土壤碳大量的流失的观测证据。Schlesinger 和 An-

draws^[22] 研究认为，在未来全球变暖的情景下，高纬度北方森林和冻土地区土壤碳的损失将是最大的，这些土壤中大量的 CO_2 释放又会加剧地球大气温室效应。

模拟研究表明，在目前气候变暖的情形下气候—碳循环之间的反馈对未来 100 年里大气 CO_2 浓度和气候变化将产生很大影响。Cox 等^[23] 利用碳—气候耦合的 GCM (HadCM3LC) 模式模拟结果显示：由于碳循环较大的正反馈，大气 CO_2 浓度显著升高，到 2100 年达到 $980\ \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ (目前 $368\ \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)，会加速未来气候变暖。这种碳循环的正反馈很大程度上是由于气候变暖导致土壤呼吸速率加快而产生的^[24]。Friedlingstein 等^[25] 利用碳—气候模式模拟了气候—碳循环之间较小的正反馈，到 2100 年大气 CO_2 浓度增加量小于 $100\ \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这些耦合碳循环的气候模式对于碳循环反馈大小的模拟差别很大，是模式本身的问题，主要来自于陆面模式中土壤呼吸对气候变暖的响应有差异^[26,27]。

因此，在陆面过程模式中进一步改进土壤呼吸参数化模块，更加准确地描述土壤呼吸对全球变暖的响应机制，对于预测未来气候变化是至关重要的。

3 土壤呼吸的模拟研究方法

土壤呼吸是一个复杂的生态学过程，受到多种因素的影响，如土壤温度、含水量、土壤微生物活性、凋落物、根系生物量和土壤碳氮含量等。许多研究者通过建立土壤呼吸模式计算土壤呼吸产生的土壤表面 CO_2 通量。

土壤呼吸模式一般分为经验模式和机理模式，经验模式通常是使用经验统计回归方法，建立土壤表面 CO_2 通量与这些环境因子变量之间的相关关系。例如，Raich 和 Schlesinger^[12] 建立了可以预测全球土壤碳排放的模式，以月为时间步长，这个模式可以利用温度和降水来反应每年土壤 CO_2 通量变化趋势。刘绍辉和方精云^[9] 分析全球范围内湿润地区森林植被的土壤呼吸与年均温度的关系，得到了年土壤呼吸量随纬度变化的拟合方程。杨昕和王明星^[28] 采取以反映大气（或土壤）水热总和状况的潜在蒸散率作为描述土壤呼吸的主要指标，得到了计算年平均土壤呼吸速率

的拟合公式。这些经验模式较为简单, 至今仍然在土壤碳循环研究中采用。虽然这些回归模式在不同的地点上对土壤表面碳通量有很好的估计, 可是这些模式很难在机理上解释环境对土壤呼吸的影响, 受到时间和空间尺度的限制, 一般不能将模式结果外推。

机理模式着重考虑土壤碳循环过程中的各种物理、化学和生物生态学机理过程, 一些基于过程的陆地生态系统模式 (CENTURY^[29,30] 和 TEM^[31,32]) 对土壤呼吸过程有非常详细的描述。例如, CENTURY 根据有机碳的周转时间不同将碳库划分成活性、慢性和惰性 3 个土壤有机质库, 将输入土壤的植物残体分为代谢库和结构库。每一个分库的土壤有机质的分解都遵循一阶速率反应动力学方程, 都有自己的最大分解速率, 并受水分、温度及微生物分解特性等其他外界因子的影响, 植被残体的木质素全部进入慢分解库, 其含量与 N 含量的比值决定了植物残体在代谢库和结构库之间的分配。该模式的时间步长以月为单位。其他生物圈模式也多采用类似的建模思想。机理模型可以解释土壤呼吸的行为, 但是, 由于时间和空间尺度的不同, 参数化方案过于复杂, 数据获取困难, 计算量过大等多种条件限制, 这些生态模式和气候模式的耦合仍然存在相当大的难度。

还有一些基于过程的土壤呼吸模式, 可以描述了土壤中 CO₂ 的生产和它们从土壤到大气的输送过程^[33,34], 模拟有日变化不同深度的土壤 CO₂ 呼吸速度、浓度和土壤表面 CO₂ 通量。在这些模式中, 土壤 CO₂ 输送方式以气态和液态 (它在土壤水中溶解) 进行对流和扩散。土壤 CO₂ 的生产, 即根呼吸和有机质分解, 其速率在最适宜的条件下遵循一阶速率反应原则, 受到土壤温度、含水量、土壤空气中 O₂ 浓度和微生物生物量的影响。这些模式对 CO₂ 动力过程有较好的描述, 因此可以模拟较短时间步长的土壤表面 CO₂ 通量; 但是, 对植被凋落物分解以及土壤内部有机质的变化没有深入的描述, 因而不能进行长时间的模拟。

4 陆面过程中土壤呼吸的模拟研究方法

陆面过程模式中对土壤呼吸模块的描述最初

是从使用经验模型开始的, 例如, Bonan^[35] 在陆面过程模式中使用 Bunnell 等^[36] 所谓的 q_0 (q_0 为土壤温度每升高 10 °C 土壤呼吸速率增加的倍数) 的经验公式, 土壤呼吸速度是表层 5 cm 土壤温度和根区土壤平均水含量的函数 ($q_{10} = 2$)。Cox 等^[23] 在 GCMs (HadCM3LC) 中也采用了类似 q_{10} 经验公式 ($q_{10} = 2$), 但是土壤呼吸速率不仅受到土壤温度和含水量的影响, 还受到土壤有机碳含量的影响。

由于受到经验模式自身弱点的限制, 目前, 陆面过程模式的研究, 正致力于将生物地球化学过程模式对土壤呼吸的描述合理地运用到 GCMs 陆面过程模式中, 发展基于过程和可适用于 GCMs 的陆地碳循环模式, 以期得到对陆面与大气之间水分、能量和碳通量交换更接近真实的模拟^[37]。

Wang 等^[38] 在加拿大 C-CLASS 陆面过程模式中, 采用了一些基于过程的陆地生态系统模式的建模思想, 发展了描述机理的土壤呼吸模块, 可以模拟每半小时的地表 CO₂ 交换通量。首先, 模式将植被凋落物作为一层, 土壤有机碳划分为 3 层, 这 3 层与土壤温度和含水量的分层相同。基于生物化学特性, 将植被凋落物层分为碳水化合物、纤维素和木质素 3 个库; 根据有机碳的周转时间不同, 将每层土壤有机质也划分为活性、慢性、惰性 3 个库; 每一层还有土壤微生物生物量库、矿物质氮库。每一层凋落物和土壤有机质的分解速率都遵循一阶速率反应方程, 由每个库含碳量决定, 受到土壤温度、含水量和微生物碳氮比率的影响。

我国具有自主知识产权的陆地生物圈碳循环模型 (AVIM)^[39,40] 最近在土壤碳循环方面得到了发展, 中国科学院地理科学与资源研究所黄攻^[41] 在 AVIM 模式中加入了土壤有机质分解和转换的模块, 主要是基于 CEVSA^[2] 和 CENTURY 模型发展起来的, 模拟了包括植物凋落物进入土壤后经有机物分解和土壤碳库的转换, 然后通过微生物异养呼吸释放 CO₂ 的过程。该模块将土壤碳库分为 8 个库, 土壤分为 4 层, 凋落物与表层土壤合为一层, 只在上 3 层厚度为 1 m 的土壤里考虑土壤碳库的转换和分解, 每个库的土壤有机质分解与转化遵循一阶速率反应原则。土壤异养呼吸产生的碳释放是各个库微生物分解过程产生所有

气态碳的总和。

5 问题与讨论

以上陆面过程模式建立了基于过程的土壤呼吸模块,为以后模式发展奠定了基础。但是,在土壤呼吸向大气释放 CO_2 通量的模拟上,这些土壤呼吸模块只考虑了土壤呼吸产生 CO_2 的过程,缺乏对 CO_2 在土壤孔隙中的输送过程以及从土壤向大气湍流交换过程的描述,没有考虑土壤空气 CO_2 浓度较高和 O_2 浓度较低会抑制根和微生物呼吸活动这一事实。这是因为土壤呼吸向大气释放 CO_2 的通量受到土壤呼吸作用产生的 CO_2 量,土壤—植被—大气系统间 CO_2 浓度梯度,以及土壤质地、孔隙度、气温、大气压和风速等诸多因素的影响^[42]。例如,当土壤通气状况不好时,会阻止土壤呼吸释放的 CO_2 向上输送,导致土壤空气 CO_2 浓度较高,也会阻止大气 O_2 向土壤内输送,引起 O_2 浓度降低。不同质地土壤对 CO_2 的吸附和释放差异很大,它起到“分子筛”的作用,因此需要考虑土壤质地对 CO_2 输送通量的影响。另外,这些土壤呼吸模块在垂直分层与土壤温度和含水量的分层相同,大都分为 3~4 层,表层土壤厚度为 0.1 m。土壤呼吸速率和 CO_2 的输送过程非常依赖土壤孔隙中的微气象条件,如温度和含水量等^[43]。表层土壤温度和含水量有较大的日变化,土壤根呼吸和有机质分解是最活跃的,但在接近表层的土壤里,温度和含水量有显著的垂直变化,需要有较细的土壤分层来反映这里土壤呼吸的垂直变化,但在这些陆面过程模式中,土壤模块相对较粗的模式分辨率难以在土壤垂直剖面上给出较准确的温度和含水量模拟,因而会引起土壤呼吸生产和输送 CO_2 过程的模拟偏差,进而影响土壤表面 CO_2 通量的模拟。

土壤呼吸模式的发展离不开实验观测,但是国内现有的实验观测资料存在局限性,不能很好地满足模式验证的需要。例如,很多通量观测站都用静态箱法观测土壤 CO_2 排放通量,采用明箱无草(割除地面上的草)的方式,这种方式观测的土壤 CO_2 排放通量包含微生物异养呼吸、根系呼吸(生长季)和凋落物呼吸的总和,因而无法直接验证土壤呼吸模式中 CO_2 的生产和输送过程

参数化方案的合理性。通量观测塔获得的 CO_2 通量是植被和土壤释放 CO_2 通量的总和^[44],在验证土壤表面 CO_2 通量的模拟上,还需要了解植被对 CO_2 排放通量的贡献,以便获得更直接的验证资料^[45]。

因此,为了提高陆面过程模式中对土壤呼吸的模拟研究,需要加强对土壤呼吸过程的观测,需要对土壤 CO_2 的生产和输送过程以及影响土壤呼吸的温度和含水量等各种影响因素有更加准确的认识。

参考文献 (References)

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). UK, Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881
- [2] Cao M K, Woodward F I. Dynamic Responses of Terrestrial Ecosystem Carbon Cycling to Global Climate Change. *Nature*, 1998, **393**: 249~252
- [3] Prentice I C, Le Quéré C, Buitenhuis E, et al. Biosphere dynamics: challenges for Earth System Models. In: *The State of the Planet: Frontiers and Challenges*, Hawkesworth C J, Sparks R S J, Eds. American Geophysical Union, 2004, 269~278
- [4] 于贵瑞,张雷明,孙晓敏,等. 亚洲区域陆地生态系统通量观测研究进展. 2004, 中国科学 (D 辑), **34**: 15~39
Yu Guirui, Zhang Leiming, Sun Xiaomin, et al. Advance in research of Asia Regional Terrestrial Ecosystem Flux Observation. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 2004, **34**: 15~39
- [5] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 1~6
- [6] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO_2 emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 1991, **351**: 304~306
- [7] 张东秋,石培礼,张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. 地球科学进展, 2005, **20** (7): 778~785
Zhang Dongqiu, Shi Peili, Zhang Xianzhou. Some advances in the main factors controlling soil respiration. *Advances in Earth Sciences* (in Chinese), 2005, **20** (7): 778~785
- [8] 彭少麟,李跃林,任海. 全球变化条件下的土壤呼吸效应. 地球科学进展, 2002, **17** (5): 705~713
Peng Shaolin, Li Yuelin, Ren Hai. Progresses in research

- on soil respiration under the global change. *Advances in Earth Sciences* (in Chinese), 2002, **17** (5): 705~713
- [9] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, **17**: 469~476
- Liu Shaohui, Fang Jingyun. Effect factors of soil respiration and temperature's effects on soil respiration on the global scale. *Acta Ecological Sinica* (in Chinese), 1997, **17**: 469~476
- [10] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**: 23~36
- [11] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用与全球碳循环. *地学前缘*, 2002, **9** (2): 351~357
- Li Yuning, Wang Guanyu, Li Wei. Soil respiration and carbon cycle. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2002, **9** (2): 351~357
- [12] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to climate. *Tellus*, 1992, **44B**: 81~99
- [13] 王庚辰, 杜睿, 孔琴心. 中国温带典型草原土壤呼吸特征的研究. *科学通报*, 2004, **49** (7): 692~696
- Wang Gengchen, Du Rui, Kong Qinxin. Experimental study on soil respiration of temperate grassland in China. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2004, **49** (6): 642~646
- [14] 杨钙仁, 童成立, 张文菊, 等. 陆地碳循环中的微生物分解作用及其影响因素. *土壤通报*, 2005, **36** (4): 605~609
- Yang Gairen, Tong Chengli, Zhang Wenju, et al. Decomposition of organic matter by soil microorganisms in terrestrial carbon cycle and it influence factors. *Chinese Journal of Soil Science* (in Chinese), 2005, **36** (4): 605~609
- [15] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biol. Biochem.*, 1995, **27**: 753~760
- [16] Houghton R A. Effects of land-use change, surface temperature, and CO₂ concentration on terrestrial stores of carbon. In: *Biotic Feedbacks in the Global Climatic System: will warming feed warming?* Woodwell G M, and Mackenzie F T, Eds. New York: Oxford University Press, 1995. 333~350
- [17] Trumbore S E, Harden J W. Accumulation and turnover of carbon in organic and mineral soils of the BOREAS northern study area. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 28817~28830
- [18] Oechel W C, Vourlitis G L, Hastings S J, et al. Change in arctic CO₂ flux over two decades; Effects of climate change at Barrow, Alaska. *Ecological Applications*, 1995, **5**: 846~855
- [19] Moore T R, Knowles R. The influence of water table levels on methane and carbondioxide emissions from peatland soils. *Can. J. Soil Sci.*, 1989, **69**: 33~38
- [20] Oechel W C, Hastings S J, Vourlitis C, et al. Recent change of arctic tundra ecosystems from a net carbon sink to a source. *Nature*, 1993, **361**: 520~523
- [21] Goulden M L, Wofsy S C, Harden J W, et al. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw. *Science*, 1998, **279**: 214~216
- [22] Schlesinger W, Andrews J. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 7~20
- [23] Cox P M, Betts R A, Jones C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, **408**: 184~187
- [24] Knorr W, Prentice I C, House J I, et al. Long-term sensitivity of soil carbon to warming. *Nature*, 2005, **433**: 298~301
- [25] Friedlingstein P, Bopp L, Ciais P, et al. Positive feedback between future climate change and the carbon cycle. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 1543~1546
- [26] Jones C D, Cox P M, Huntingford C. Uncertainty in climate-carbon cycle projections associated with the sensitivity of soil respiration to temperature. *Tellus*, 2003, **55 B**: 642~648
- [27] Friedlingstein P, Dufresne J L, Cox P M, et al. How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? *Tellus*, 2003, **55B**: 692~700
- [28] 杨昕, 王明星. 一个计算平均土壤呼吸速率和土壤碳密度的简单模型. *中国科学院研究生院学报*, 2001, **18** (1): 90~96
- Yang Xin, Wang Mingxing. A simple model in calculating average soil respiration rate and soil carbon density. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2001, **18** (1): 90~96
- [29] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1987, **51**: 1173~1179
- [30] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**: 785~809
- [31] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, **363**: 234~240
- [32] McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium responses of global net primary production and carbon storage to doubled CO₂: Sensitivity to changes in vegetation nitrogen chemistry. *Global Biogeochemical Cy-*

- cles, 1997, **11**: 173~190
- [33] Simunek J, Suarez D L. Modelling of carbon dioxide transport and production in soil: 1 Model development. *Water Resour. Res.*, 1993, **29**: 487~497
- [34] Fang C, Moncrieff J B. A model for soil CO₂ production and transport. I. Model development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, **95**: 225~236
- [35] Bonan G B. Land-atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 2817~2831
- [36] Bunnell F L, Tait D E N, Flanagan P W, et al. Microbial respiration and substrate weight loss-I. A general model of the influence of abiotic variables. *Soil Biol. Biochem.*, 1977, **9**: 33~40
- [37] Zhang Y, Grant R F, Flanagan L B, et al. Modelling CO₂ and energy exchanges in a northern semiarid grassland using the carbon and nitrogen-coupled Canadian Land Surface Scheme (C-CLASS). *Ecol. Model.*, 2005, **181**: 591~614
- [38] Wang S, Grant R F, Versegny D L, et al. Modelling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS - the Canadian Land Surface Scheme. *Ecol. Model.*, 2001, **142**: 135 ~154
- [39] Ji Jinjun. A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface. *Journal of Biogeography*, 1995, **22**: 445~451
- [40] 季劲钧, 余莉. 地表面物理过程与生物地球化学过程耦合反馈机理的模拟研究. *大气科学*, 1999, **23** (4): 439~448
- Ji Jinjun, Yu Li. A simulation study of coupled feedback mechanism between physical and biogeochemical processes at the surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (4): 439~448
- [41] 黄玫. 中国陆地生态系统水、热通量和碳循环模拟研究, 中国科学院地理科学与资源研究所博士学位论文, 2005
- Huang Mei. The study on simulation of water and heat fluxes and carbon cycle in land ecological system in China. Ph.D. dissertation (in Chinese), Institute of Geographic Sciences and natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2005
- [42] 王妮, 周晓梅, 郭继勋. 东北羊草草原两种主要群落环境因素对土壤呼吸贡献量的影响. *草业学报*, 2002, **11** (1): 12~16
- Wang Wei, Zhou XiaoMei, Guo Jixun. Effect of environmental factors on CO₂ release rate of soil respiration of two main communities in Lymus chinensis grassland in north-eastern China. *Acta Prataculture Sinica* (in Chinese), 2002, **11** (1): 2~16
- [43] 刁一伟, 郑循华, 王跃思, 等. 土壤温度和湿度对冬小麦田土壤空气 CO₂浓度的影响. *气候与环境研究*, 2004, **9** (4): 584~590
- Diao YiWei, Zheng XunHua, Wang YueSi, et al. Effects of soil temperature and moisture on soil CO₂ concentration of wheat fields. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (4): 584~590
- [44] 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验. *气候与环境研究*, 2004, **9** (2): 378~389
- Liu HuiZhi, Dong WenJie, Fu CongBin, et al. The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu, Northeast China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 378~389
- [45] 姜纪峰, 延晓冬, 黄耀, 等. 半干旱区农田和草地与大气间二氧化碳和水热通量的模拟研究. *气候与环境研究*, 2006, **11** (3): 413~424
- Jiang JiFeng, Yan XiaoDong, Huang Yao, et al. Simulation of CO₂ and sensible/latent heat fluxes exchange between land surface and atmosphere over cropland and grassland in semi-arid region. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (3): 413~424