

中国东北样带碳循环研究进展*

周广胜¹ 王玉辉^{1,2} 许振柱¹ 周莉¹ 蒋延玲¹

1. 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093;

2. 国家气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016

摘要 近年来, 以中国东北样带为研究对象的陆地碳循环研究取得了较大进展, 不仅建立了用于模型发展与比较研究的不同时间和空间尺度的中国东北样带陆地碳循环数据集, 分析了自然与人为干扰下草原生态系统土壤呼吸作用的日、季动态, 而且从机理上探讨了影响土壤呼吸作用的主导影响因子, 发展了叶片-冠层尺度耦合的羊草草原生态系统动态模型和基于林窗原理的森林生态系统动态模型。在此基础上, 指出了当前陆地碳循环研究的不足, 进而针对我国作为发展中国家, 财力有限的特点, 提出了未来中国东北样带陆地碳循环研究的发展趋势与研究重点, 以增进对陆地碳循环的理解及准确地评估陆地碳收支。

关键词 中国东北样带 碳循环 土壤呼吸作用 生产力 模型

全球变化是当前最受人们关注的科学问题之一, 尽管围绕着全球变化还存在许多不确定性因素, 但是与全球变化密切相关的大气 CO₂ 浓度持续增加却是一个不争的事实。正因为如此, 作为温室气体的主要成分 CO₂ 浓度的变化趋势、源与汇及其输送规律等已成为全球变化中的焦点问题之一。陆地生态系统由于其对大气 CO₂ 浓度变化的巨大影响以及与人类活动密切相关而倍受人们的重视。准确地评估陆地生态系统碳动态不仅是准确地估算未来大气 CO₂ 浓度、预测气候变化及其对陆地生态系统影响的关键^[1], 也是各国保证经济持续发展及履行《联合国气候变化框架公约(UNFCCC)》与《京都议定书》国际公约及制定应对策略的关键。

全球变化的陆地样带为理解陆地生态系统的碳循环过程、控制因子及其准确评估陆地生态系统碳收支提供了有效的研究平台。全球变化的陆地样带是由一系列生态研究站点、观测点和研究样地组成的研究平台, 反映了某种影响陆地生态系统结构、功能和组成, 生物圈-大气圈的痕量气体交换和水分循环的全球变化驱动力, 如温度、降水和土地利用的变化^[2]。目前, 国际地圈-生物圈计划(IGBP)在

全球 4 个关键地区共启动了 15 条 IGBP 陆地样带。中国东北样带(NECT: NorthEast China Transect)即为 IGBP 陆地样带之一^[2~4]。

在国家自然科学基金委员会、国家科技部和中国科学院的大力资助下, 特别是在国家“八五”攀登项目“我国未来生存环境变化趋势预测研究”和国家自然科学基金委员会“九五”重点项目“全球变化的中国东北森林-草原样带研究”的共同资助下, 以中国东北样带为研究对象, 以样带上的 3 个长期定位生态观测台站: 长白山森林生态系统定位研究站、内蒙古锡林格勒草原生态系统定位研究站和长岭(松嫩平原)草地实验站为研究基点, 采用野外样带调查、生态系统定位观测、生态建模及地理信息系统相结合的方法, 研究了东北样带的碳循环及其对气候变化的反应, 促进了中国全球变化的研究, 增进了对陆地生态系统碳循环的理解, 取得了丰硕的成果, 亦为进一步研究奠定了基础。

本文将从陆地碳循环数据库、土壤呼吸作用研究及生态系统生产力动态模拟 3 个方面, 对近年来中国东北样带陆地生态系统碳循环的研究进展作一评述, 进而指出未来的发展趋势与研究重点, 为增

2003-02-11 收稿, 2003-04-16 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(G1999043407)、中国科学院知识创新工程(KZCX1-SW-01-12, KSCX2-1-07)和国家自然科学基金(批准号: 30070642, 30028001, 40231018)资助项目

E-mail: zhoughs@public2.bta.net.cn

进对全球碳循环的理解及评估与预测陆地生态系统的碳收支和发展趋势提供依据。

1 陆地生态系统的碳循环数据库

大量准确的观测资料是研究中国东北样带陆地碳循环及其对气候变化响应和建模的关键。基于中国东北样带各种背景图件(地形、地质、地貌、土壤、水文、气候等)的数字化资料,沿中国东北样带每25 km一采样点的高密度高强度综合野外考察(1994, 1997, 1998和2001年),以及在样带上3个长期定位生态观测台站典型生态系统的叶片-个体生态系统不同层次的综合观测、样带优势植物对环境胁迫(水分、温度和CO₂浓度)的模拟试验,结合遥感资料、相关文献资料的收集,借助于计算机及地理信息系统,建立了用于模型发展和比较研究的不同时间和空间尺度的全球变化中国东北样带数据集。

该数据库包括用于古气候和古植被重建的表土花粉和剖面孢粉数据库,现代的用于景观至区域尺度气候-植被关系研究的植被、土壤、地形、土地利用、气候资料、遥感(NDVI)、植被生物量和生产力、样带优势植物叶片的光合作用数据库,以及用于个体至生态系统水平动态模拟的土壤呼吸作用、主要优势种植物的光合生态生理特性、优势植物群落的光合作用及地上/地下生物量与生产力、土壤理化性状、凋落物分解、优势植物C, N, P, S含量、小气候梯度的动态监测等数据库。该数据库的建立为理解陆地生态系统的碳循环规律、过程、控制因子及其与环境的相互作用,最终建立预测陆地生态系统碳收支的动态评估模型奠定了基础^[4]。

2 典型生态系统土壤呼吸作用的研究

土壤呼吸作用是指未受扰动的土壤中产生CO₂的所有代谢作用,包括3个生物学过程(植物根呼吸、土壤微生物呼吸及土壤动物呼吸)和一个非生物学过程(含碳物质的化学氧化作用)。土壤呼吸作用释放的CO₂中约30%~50%来自根系的自养呼吸作用,其余部分主要源于土壤微生物对有机质的分解作用,即异养呼吸作用。全球土壤呼吸作用的碳估计量为68~100 Gt/a,约是输入土壤表层新鲜岩屑数量的2.3~3.3倍,仅次于全球陆地总初级生产力(GPP)的估算值100~120 Gt/a,而高于净初级生产力(NPP)的量值50~60 Gt/a,是全球碳循环中一个主要流通途径。因此,土壤呼吸作用对

于了解陆地碳循环极为关键^[5]。

草地不仅占全球土地总面积的1/3,而且也是目前人类活动影响最为严重的区域,对草地生态系统碳循环及其影响因素的研究是认识全球碳循环的关键之一^[6]。草原生态系统区别于森林等其他陆地生态系统的特点之一就是它不具有固定而明显的地上碳库,其碳素贮量绝大部分集中在地下土壤中,而实际上草地生态系统碳循环的主要过程也是在土壤中完成的。因此,草地土壤呼吸作用是理解草地生态系统碳循环的重要环节^[7]。

羊草(*Leymus chinensis*)草原作为广泛分布于欧亚温带草原区东缘的地带性草原类型,总面积约42 000 km²,其中一半左右分布在中国,是中国东北样带分布范围最大的陆地生态系统。研究表明^[8],内蒙古锡林河流域围栏20年固定样地羊草群落土壤呼吸作用具有强烈的日动态特征,呈单峰型曲线,白天强,晚上弱。土壤呼吸速率的最大值出现在中午12:00,最小值出现在凌晨3:00;日平均土壤呼吸速率(1180.4 ± 308.7 (± SE) mg·m⁻²·h⁻¹)接近于上午9:00和下午7:00的土壤呼吸速率。在日的时间尺度上,羊草群落的瞬时土壤呼吸作用与空气温度呈明显线性关系。土壤呼吸作用的季节动态亦表现为单峰型曲线,暖季强,冷季弱^[9]。土壤呼吸作用自5月初逐渐增加,至7月下旬达到最大,而后逐渐下降。无放牧羊草群落生长季节的土壤呼吸作用碳总量为249.4~320.7 g·m⁻²·a⁻¹。羊草群落的季节土壤呼吸作用受温度和水分的影响,对围栏20年固定样地羊草群落土壤呼吸作用(R, mg·m⁻²·a⁻¹)、气温(T, °C)和土壤含水量(M, %)连续2个生长季节(1998~1999年)的28组同步观测资料分析表明,气温对土壤呼吸的作用大于水分,其关系如下:

$$\ln(R) = 5.8596 + 0.0125 M + 0.0394 T + 0.0049 M \cdot T \quad (r = 0.84, p < 0.01).$$

大针茅(*Stipa grandis*)草原是亚洲中部草原区特有的一个群系,主要分布于中国东北样带的典型草原区。与羊草群落不同,围栏20年固定样地大针茅群落土壤呼吸作用的季节动态近似地呈梯形曲线:6月初到7月底土壤呼吸作用快速增强;随后趋于平稳,约2.51 g·m⁻²·d⁻¹;至8月底或9月初又迅速降低^[10,11]。分析大针茅群落土壤呼吸作用与地上生物量、地下生物量、降水、温度和土壤含

水量的关系发现, 土壤呼吸作用的季节变化与群落的地下生物量呈负相关, 而与地上生物量活体干重及总生物量呈显著正相关; 土壤呼吸作用的时间变异与地温的变化趋势并不一致, 而与土壤含水量呈高度的正相关, 其中0~20 cm土壤含水量(X , %)是影响大针茅群落土壤呼吸作用(Y , $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)的关键因子^[10]:

$$Y = 3.469 \lg(X) - 2.053 \quad (r = 0.92, p < 0.01),$$

同时, 大针茅群落土壤 CO_2 排放速率的年际变化很大^[11].

沿降水梯度的不同草地类型土壤呼吸速率表现为^[8]: 羊草草原($1471.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) > 草甸草原($1304.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) > 大针茅草原($895.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) > 干草原($756.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$). 不同草地类型的土壤呼吸速率与其年降水的变化并不一致: 草甸草原(>450 mm) > 羊草草原、大针茅草原(300~350 mm) > 干草原(<200 mm). 这表明, 草原土壤呼吸作用不仅与环境因子有关, 还与草地类型有关. 王玉辉等^[12]对东北松嫩平原碱化草甸土和风沙土羊草群落的土壤呼吸作用观测表明, 尽管两种土壤呼吸作用的季节动态相似, 但碱化草甸土羊草土壤呼吸速率明显地高于风沙土土壤呼吸作用速率, 日均土壤呼吸作用速率分别为 2.763 和 $1.705 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

放牧是影响草地土壤呼吸作用的主要干扰方式. 研究表明, 过度放牧使北美温带草原的土壤呼吸作用增强^[13], 重度放牧6~8年后澳大利亚东北部的半干旱草原群落的土壤有机碳含量没有显著变化, 但土壤微生物量下降24%~51%^[14]. 对中国东北样带不同草地利用方式下草地土壤呼吸作用的分析表明^[8], 草甸开垦将导致草甸草原土壤呼吸作用增加(由 1304.3 增加至 $1707.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), 放牧将导致大针茅群落土壤呼吸作用增加(由 895.6 增加至 $1081.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), 而使羊草群落土壤呼吸作用减弱(由 1471.2 减少至 $1046.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$). 这表明, 放牧对典型草原(羊草草原和大针茅草原)土壤呼吸作用的影响并不相同, 草地土地利用方式的变化不一定导致土壤呼吸作用的增加, 亦即草地土壤呼吸作用的变化取决于草地的类型和土地利用的类型.

内蒙古锡林河流域过度放牧下羊草群落连续2年的土壤呼吸作用观测表明^[9], 放牧并没有改变土

壤呼吸作用的季节动态, 放牧羊草群落生长季的土壤呼吸作用总量在 $237.0\sim 305.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 与无放牧条件下无显著差异^[15]. 放牧对羊草群落的地上、地下生物量的影响非常明显, 对土壤有机质含量、水分含量无显著影响, 0~10 cm的土壤容重有所增加^[15]; 土壤微生物总数量显著减少(其中好气性细菌减少, 嫌气性细菌增多)^[16]. 但过度放牧将严重影响大针茅群落的土壤呼吸作用, 20年完全封育与放牧下的大针茅群落土壤呼吸作用分别为 225.0 和 $52.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[11]. 由于羊草群落与大针茅群落的年降水量相近, 放牧对两种草原群落影响的不同可能与这两种群落的性质有关.

3 陆地生态系统生产力动态模拟

植物总初级生产力(GPP)、净第一性生产力(NPP)、异氧呼吸(RH)及其对于地理变化与季节变化的响应是理解陆地碳循环的关键, 在《联合国气候变化框架协议》谈判过程中被一再强调. 由于不存在区域或全球尺度的总生产力、净生产力和异氧呼吸的直接观测, 为了增进理解及评估陆地生态系统在全球碳循环中的作用, 局地的观测需要通过发展全球尺度的陆地生态系统模型以推广到全球. 近年来, 通过观测和模型, 特别是通过国际地圈-生物圈计划(IGBP)的核心项目“全球分析、解释和模型(GAIM)”, “数据信息系统(DIS)”, 以及“全球变化与陆地生态系统(GCTE)”, 已经大大地改进了陆地生态系统总初级生产力和净第一性生产力的估算精度.

近来, 基于中国东北样带的观测与模拟试验资料, 结合卫星遥感信息, 对生态系统的能量、水分、碳和养分循环以及气候-植被分布进行了大量的研究. 一方面, 利用国际上广泛应用的生态系统动态模型进行中国东北样带生态系统的动态模拟. 如肖向明等^[17]将著名草地生态系统模型(CENTURY模型)应用到内蒙古典型草原生态系统, 在利用实测资料检验该模型的基础上, 模拟了未来气候变化对羊草草原和大针茅草原的生物量和土壤有机质含量的可能影响; Zhou等^[18]基于CENTURY模型评估了中国东北样带典型生态系统的碳收支. 另一方面, 针对中国东北样带的生态系统特点开展了中国东北样带生态系统的模拟研究.

3.1 草地生态系统生产力的动态模拟

建立水分驱动下的反映生态系统生物地球

物理/化学过程的多尺度集成生态系统动态模型是定量解释陆地生态系统对于干旱化的适应与调整机制,以及预测陆地生态系统对全球变化响应的关键。而弄清植物叶片气孔导度和光合作用的影响因子,并建立相关模型是最终建立多尺度集成生态系统动态模型的基础。

以反映水分梯度变化的中国东北样带(NECT)上的松嫩平原羊草草甸草原为研究对象,从影响羊草叶片光合作用的机理出发,基于松嫩平原草甸草原羊草叶片的光合生理生态特性、羊草群落小气候梯度以及羊草群落生物量等的野外动态观测,分析了羊草叶片的光合生理特性动态特征,指出影响羊草叶片气孔导度的主要环境因子是光合有效辐射(PAR)、叶片与空气之间的水汽压亏损(VPD)、以及空气温度(T_a);而影响羊草叶片净光合速率的主要因子是胞间 CO_2 浓度、气孔导度、空气 CO_2 浓度及蒸腾速率。在此基础上,比较了当前国际上两类代表性气孔导度模型在羊草草原的适应性,指出基于Jarvis模型所改建的气孔导度模型比依据Leuning改进的Ball模型所建立的气孔导度模型具有更好的模拟效果,据此建立了适于羊草叶片的气孔导度模型^[19]:

$$g_s = PAR(-2.01 T_a^2 + 147.74 T_a - 2321.11) / ((444.62 + PAR)(-538.04 + VPD))$$

该模型的建立不仅有助于从数量上探讨羊草叶片气孔的习性,而且为进一步模拟叶片光合作用奠定了基础。基于建立的羊草叶片气孔导度模型,与叶片光合生化模型、边界层导度模型和能量平衡方程相结合建立了羊草叶片净光合速率模型,与野外观测资料比较表明,该模型有能力预测环境因子,如 CO_2 、温度、辐射、湿度及风速等对羊草叶片净光合速率、气孔导度等的影响^[20,21]。在此基础上,通过大叶模式和多层模式相结合的尺度化方法,同时考虑到羊草群落的呼吸作用,最终建立了多尺度集成的羊草群落净第一性生产力动态模型。据比较,该模型的模拟结果与实际观测值有一致的变化规律,而且较国际著名草地生态系统模型——CENTURY模型对生产力的模拟更接近于实际观测值。

3.2 森林生态系统生产力的动态模拟律

红松针阔叶混交林是我国东北东部地带性植

被,也是全球温带针阔叶混交林的组成部分,不仅蕴藏着巨大的森林资源,而且调节和维护着该地区的气候,是东北大平原农业发展的屏障。但是,全球变化将通过改变大气温度、降水和 CO_2 含量直接或间接地影响森林群落。因此,探讨红松针阔叶混交林群落对于全球变化的潜在反应具有重要意义。

基于林窗模型建模原理,建立了适于红松针阔叶混交林动态模型(BKPF林窗模型)^[22]。该模型包括树木最优生长模型、光与林木相对生长速率关系模型、气温与林木相对生长速率关系模型、 CO_2 浓度倍增与林木相对生长速率关系模型、土壤湿度与林木相对生长速率关系模型、基于生长状况和年龄的林木枯死随机判定模型等。该模型尽管与其他林窗模型大同小异,但对模型参数的选择更适合于红松针阔叶混交林;并基于小兴安岭地区伊春红松林演替过程对模型进行了验证,模拟结果与该地区真实红松林演替过程基本一致^[23]。

针对林窗模型难以在区域尺度应用的不足,延晓冬等^[24,25]结合当前流行的FORET林窗模型和Zelig模型,并考虑到树种的生活史,发展了长白山森林生态系统的林窗模型——NEWCOP(northeastern woods competition occupation processor)。该模型由7个子模型组成:生长模型,死亡模型,更新模型,土壤模型,生物气候模型,林冠模型和干扰模型。目前,该模型涉及东北地区重要的森林树种共34种,在整个东北林区,即大兴安岭、小兴安岭和长白山地区都得到极好的验证。该模型不仅可模拟目前气候条件下东北地区森林的水平分布和垂直分布,而且也可再现森林的更新演替和生产力。

为完善对阔叶红松林凋落物分解、积累与归还的模拟,基于阔叶红松林林地死根量和分解速率资料,结合用以描述森林生态系统生物量随时间变化的Mitscherlich模型,建立了阔叶红松林生态系统凋落物的年凋落量、年分解量和累积量关系模型,以及以林地死根总量和根系的分解速率推算森林生态系统根系的年死亡量模型,从而解决了在计算森林生态系统根系的年死亡量时因无法直接测定根系的死亡量而带来的困难^[26]。

4 中国东北样带碳循环研究展望

全球碳循环的模拟研究对了解地球系统中各圈层的相互作用以及气候系统的变化具有重要意义。碳通量和碳贮量所构成的碳循环由一系列过程控

制,包括:大气、海洋和陆地水圈的物理过程,陆地生物和生理生态过程,生物地球化学转变,陆地生物圈的自然和人类活动引起的扰动,如火、农业和林地开垦,与化石燃料释放相联系的过程.对这些过程在机理层次和综合层次上的理解是认识碳循环动态的关键.同样地,过程的理解也是发展诊断和预测方法以加强未来全球碳循环管理基础的关键.目前对于影响全球碳循环的过程、控制机制和相互作用的理解还远远不够,特别是关于当代碳循环的关键生物物理过程还没有在模型中得到体现,主要包括:

(1)土地利用、生态系统生理学和控制碳进出陆地系统的扰动之间的相互作用;

(2)陆地碳分配的动态及其对环境的响应;

(3)异养呼吸作用的动态及其对环境的响应;

(4)景观尺度碳的侧向流动.

总的来说,引起全球碳通量的模式与变异性以及碳通量的过程、控制与相互作用不确定的原因主要有以下3个方面:

(1)驱动全球碳模型的观测网稀少,特别是反应不同水热条件下的系统性观测研究非常缺乏;

(2)观测方法与规范的不统一;

(3)人类活动对碳循环时空变化的作用不清楚.

由此造成了生态系统碳循环过程及其机制的不确定性,模型的不完善,进而制约着对全球碳平衡的认识,是出现“未知汇”(missing sink)现象、预测全球变化及其影响不确定性的重要原因.

位于全球中纬度地区的中国东北样带既反映了水分梯度变化,又反映了土地利用方式的变化,为陆地碳循环的研究提供了有效的研究平台.近年来,在国家自然科学基金委员会、国家科技部和中国科学院等部门的大力资助下,对以水分驱动的全球变化中国东北样带开展了大量的观测与研究.不仅建立了用于模型发展和比较的不同时间和空间尺度的中国东北样带数据集,而且从机理上初步探讨了全球变化对于森林、草甸草原和典型草原的可能影响,发展了用于多尺度耦合的羊草草原生态系统动态模型和基于林窗原理的森林生态系统碳动态模型,在资料和研究方法上对进一步探讨全球变化碳循环具有重要的贡献.正因为如此,全球变化的中国东北样带研究受到了国内外学者的高度重视,与美国科罗拉多大学、哥伦比亚大学,加拿大林务局,日本岐阜大学和千叶大学等建立了合作关

系,并在国家自然科学基金委员会的大力支持下于2001年在中国首次举办了“第12次国际全球变化与陆地生态系统科学委员会会议”.

卫星遥感具有丰富的信息和实时数据处理与传输能力,以遥感信息作为信息源的陆地生态系统碳动态实时监测与模拟研究愈来愈显出其巨大的优越性.尽管已经基于遥感植被指数(NDVI)与植物叶面积的关系开展了植被净第一性生产力的遥感监测与模拟研究^[27,28],但研究工作相当初步,还没有从机理上揭示陆地生态系统的碳收支动态及其对全球变化的响应,有待于进一步加强中国东北样带遥感监测与模拟.

我国作为发展中国家,财力有限.我国的全球变化研究应针对我国陆地生态系统的特点,充分利用我国特殊的生态环境与区域特色,做出一些在国际上既有显示度,又服务于我国社会经济可持续发展的研究成果,特别是要为我国发展战略西移的实施、履行《京都议定书》以及制定适应与减缓全球变化的我国陆地生态系统可持续发展模式提供科学依据.为此,未来中国东北样带的碳循环研究拟在注重各科学计划交叉集成的同时,加强以下方面研究:

(1)加强典型生态系统碳循环与环境因子的同时观测,特别是强调国际公认的涡相关技术的应用,完善中国东北样带生态系统碳循环资料库;

(2)强调陆地生态系统碳循环的过程研究,建立基于过程与机理的陆地碳循环模型;

(3)碳循环模型与气候模型的耦合研究,揭示陆地生态系统与大气之间的动态响应和反馈机制;

(4)研究人类干扰对陆地碳循环过程与时空格局的影响,尤其是土地利用和土地覆盖变化对陆地碳循环的影响;

(5)遥感驱动的陆地生态系统碳循环模型研制,并基于遥感资料,探讨模型的尺度转换和参数化理论,发展遥感信息驱动的、多尺度集成碳动态模型;

(6)从地球系统科学的角度研究陆地碳循环,建立包括大气-海洋-陆地-生物-化学以及社会过程(人类工农业活动影响)耦合的陆地碳循环模式;

(7)集数据库、模型库和专家咨询系统于一体的陆地生态系统碳评估数字系统的建立,以实现陆地碳收支的动态仿真与海量数据管理,以便于政府针对碳排放做出适宜的对策.

参 考 文 献

- 1 Berrien Moore III, et al. Earth metabolism: Understanding carbon cycling. *AMBIO*, 1994, 23(1): 4
- 2 Koch G W, et al. The IGBP Terrestrial Transects: Science Plan IGBP Report No 36. Stockholm: IGBP, 1995
- 3 GCTE Core Project Office. GCTE Core Research: 1993 Annual Report, Report No 1, Canberra: GCTE, 1994
- 4 周广胜, 等. 全球变化与中国东北样带(NECT). *地学前缘*, 2002, 9(1): 198
- 5 李玉宁, 等. 土壤呼吸作用和全球碳循环. *地学前缘*, 2002, 9(2): 351
- 6 Parton W J, et al. Observation and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochem Cycles*, 1993, 7: 785
- 7 Klein D A. Seasonal carbon flow and decomposer relationship in a semi-arid grassland soil. *Ecology*, 1977, 58: 184
- 8 Dong Y, et al. Fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ from a typical temperate grassland in Inner Mongolia and its daily variation. *Bulltin of Chinese Sciences*, 2000, 45(17): 1590
- 9 李凌浩, 等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因素研究. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 680
- 10 陈四清, 等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO₂ 排放速率研究. *植物学报*, 1999, 41(6): 645
- 11 崔骁勇, 等. 大针茅典型草原土壤 CO₂ 排放规律研究. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 390
- 12 王玉辉, 等. 两种土壤类型对羊草生物学特征的影响. *草地学报*, 2000, 8(3): 220
- 13 Risser D G, et al. The True Prairie Ecosystem. Stroudsburg/Pennsylvania: Hutchinson Ross Publishing Company, 1981. 244
- 14 Holt J A. Grazing pressure and soil carbon, microbial biomass and enzyme activities in semi-arid Northeastern Australia. *Applied Soil Ecology*, 1997, 5: 143
- 15 贾树海, 等. 沿放牧梯度的土壤物理性状变化. *草地生态系统研究*, 1997, 5: 12
- 16 柳丽萍, 等. 不同放牧强度下羊草和大针茅草原土壤微生物的生物学特征和生物多样性. *草地生态系统研究*, 1997, 5: 70
- 17 肖向明, 等. 内蒙古锡林河流域典型草原初级生产力和土壤有机质的动态及其对气候变化的反应. *植物学报*, 1996, 38(1): 45
- 18 Zhou G, et al. Carbon balance along Northeast China Transect (NECT-IGBP). *Science in China, Series C*, 2002, 45: 18
- 19 王玉辉, 等. 羊草叶片气孔导度对环境因子的响应模拟. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 739
- 20 王玉辉, 等. 羊草叶片净光合速率的模拟研究. 见周广胜主编, 中国东北样带(NECT)与全球变化-干旱化、人类活动与生态系统, 北京: 气象出版社, 2002. 133~144
- 21 王玉辉, 等. 松嫩平原羊草群落生产力的模拟研究. 见周广胜主编, 中国东北样带(NECT)与全球变化-干旱化、人类活动与生态系统, 北京: 气象出版社, 2002. 145~145
- 22 陈雄文, 等. 林窗模型 BKPF 模拟红松针阔叶混交林群落对气候变化的潜在反应. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 327
- 23 陈雄文, 等. 林窗模型 BKPF 模拟伊春地区红松针阔叶混交林采伐迹地对气候变化的潜在反应. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 513
- 24 延晓冬, 等. 中国东北森林生长演替模拟模型及其在全球变化研究中的应用. *植物生态学报*, 2000, 24(1): 1
- 25 延晓冬, 等. 气候变化对小兴安岭森林影响的模拟研究. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 312
- 26 王 森, 等. 森林生态系统中凋落物的分解、积累与归还模型的研究. *应用生态学报*, 2000, 11(增刊): 151
- 27 高 琼, 等. 中国东北样带对全球变化响应的动态模拟-一个遥感信息驱动的区域植被模型. *植物学报*, 1997, 39(9): 800
- 28 郑元润, 等. 基于 NDVI 的中国天然森林植被净第一性生产力模型. *植物生态学报*, 2000, 24(1): 9