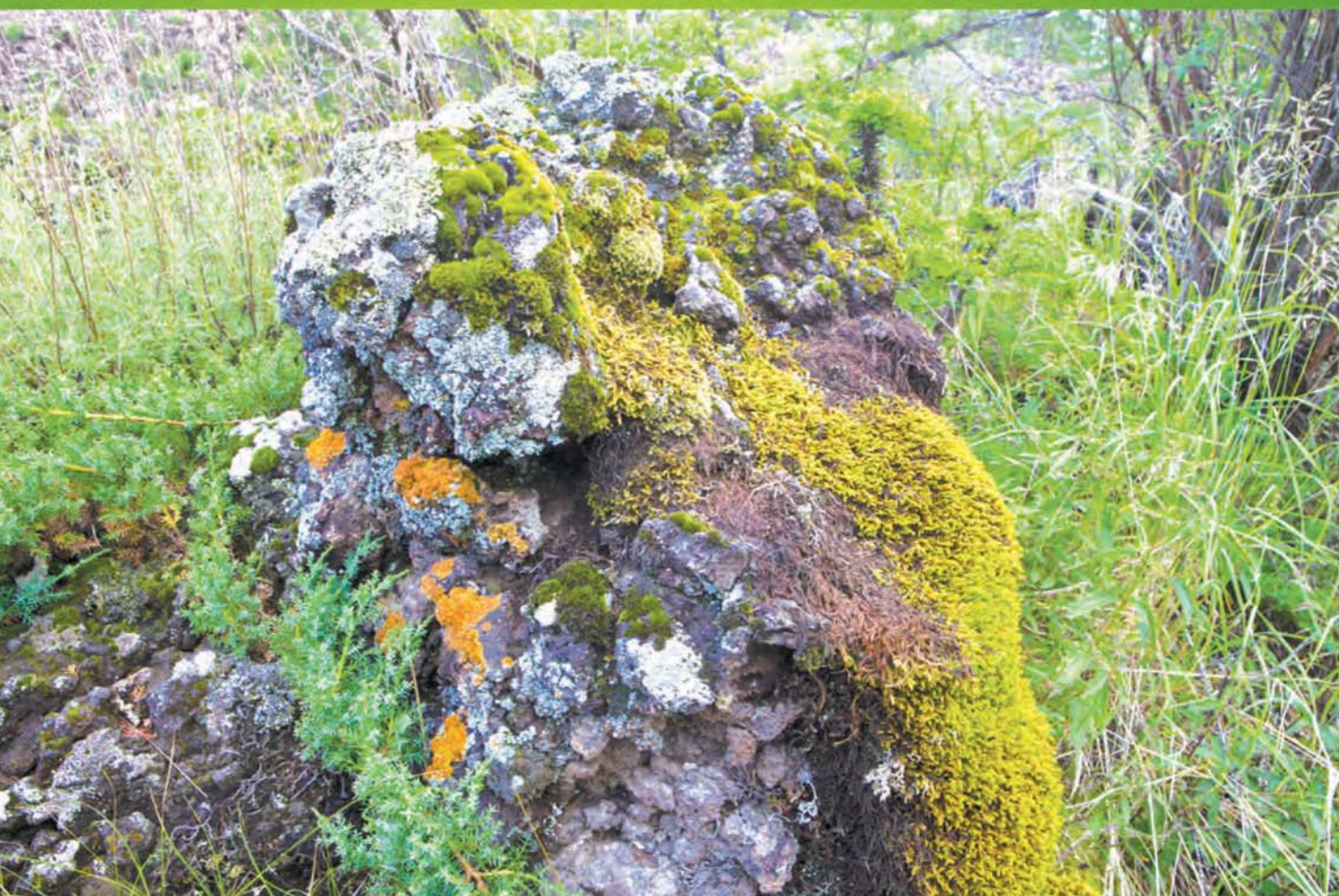


ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第6期 Vol.32 No.6 **2012**

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 32 卷 第 6 期

2012 年 3 月 (半月刊)

目 次

高原草被退化程度的遥感定量监测——以甘肃省玛曲县为例.....	周坚华,魏怀东,陈芳,等 (1663)
基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价.....	殷旭旺,渠晓东,李庆南,等 (1677)
哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用.....	杞金华,章永江,张一平,等 (1692)
青岛沿岸水体原生生物群落与水质状况的关系.....	杨金鹏,姜勇,胡晓钟 (1703)
增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究.....	亓伟伟,牛海山,汪诗平,等 (1713)
三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征.....	揭胜麟,樊大勇,谢宗强,等 (1723)
三峡库区澎溪河鱼类时空分布特征的水声学特性.....	任玉芹,陈大庆,刘绍平,等 (1734)
强壮前沟藻化感物质分析.....	冀晓青,韩笑天,杨佰娟,等 (1745)
饥饿对中间球海胆 MYP 基因转录表达的影响.....	秦艳杰,孙博林,李霞,等 (1755)
贺兰山牦牛冬春季的生境选择.....	赵宪南,苏云,刘振生,等 (1762)
利用元胞自动机研究一类捕食食饵模型中的斑块扩散现象.....	杨立,李维德 (1773)
转 <i>Cry1Ab</i> 和 <i>Cry1Ac</i> 融合基因型抗虫水稻对田间二化螟和大螟种群发生动态的影响.....	李志毅,隋贺,徐艳博,等 (1783)
光谱和光强度对西花蓟马雌虫趋光行为的影响.....	范凡,任红敏,吕利华,等 (1790)
荧光素对舞毒蛾核型多角体病毒不同地理品系的增效与光保护作用.....	王树娟,段立清,李海平,等 (1796)
不同利用强度下绿洲农田土壤微量元素有效含量特征.....	李海峰,曾凡江,桂东伟,等 (1803)
稻田温室气体排放与土壤微生物菌群的多元回归分析.....	秦晓波,李玉娥,石生伟,等 (1811)
黄土高原典型区域土壤腐殖酸组剖面分布特征.....	党亚爱,李世清,王国栋 (1820)
紫色土菜地生态系统土壤 N_2O 排放及其主要影响因素.....	于亚军,王小国,朱波 (1830)
中国亚热带典型天然次生林土壤微生物碳源代谢功能影响因素.....	王芸,欧阳志云,郑华,等 (1839)
基于 K-均值算法模型的区域土壤数值化分类及预测制图.....	刘鹏飞,宋轩,刘晓冰,等 (1846)
淹水条件下秸秆还田的面源污染物释放特征.....	杨志敏,陈玉成,张赞,等 (1854)
推迟拔节水对小麦氮素积累与分配和硝态氮运移的影响.....	王红光,于振文,张永丽,等 (1861)
江苏省冬小麦渍害的风险区划.....	吴洪颜,高苹,徐为根,等 (1871)
草原植物根系起始吸水层深度测定方法及其在不同群落状态下的表现.....	郭宇然,王炜,梁存柱,等 (1880)
亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (1888)
高寒草原植物群落种间关系的数量分析.....	房飞,胡玉昆,张伟,等 (1898)
菊花近缘种属植物幼苗耐阴特性分析及其评价指标的确定.....	孙艳,高海顺,管志勇,等 (1908)
南方菟丝子寄生对喜旱莲子草生长及群落多样性的影响.....	王如魁,管铭,李永慧,等 (1917)
基于 cDNA 克隆的亚热带阔叶林和针叶林生态系统担子菌漆酶基因多样性及其群落结构研究.....	陈香碧,苏以荣,何寻阳,等 (1924)
细柄阿丁枫和米槠细根寿命影响因素.....	黄锦学,凌华,杨智杰,等 (1932)
基于 TM 遥感影像的森林资源线性规划与优化配置研究.....	董斌,陈立平,王萍,等 (1943)
基于 CFD 的城市绿地空间格局热环境效应分析.....	刘艳红,郭晋平,魏清顺 (1951)
专论与综述	
生态补偿效率研究综述.....	赵雪雁 (1960)
研究简报	
黄河三角洲石油生产对东营湿地底栖动物群落结构和水质生物评价的影响.....	陈凯,肖能文,王备新,等 (1970)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 34 * 2012-03	

封面图说: 植物生命演进石——这不是一块普通的火山岩,而是一块集中展示植物“原生演替”过程最有价值的石头。火山熔岩冷却后的玄武岩是无生命无土壤的真正“裸石”,风力使地衣的孢子传入,在一定温湿度环境下,开始出现了壳状地衣,壳状地衣尸体混合了自然风化的岩石碎屑提供的条件使叶状、枝状地衣能够侵入,接着苔藓侵入,是它们启动了土壤的形成,保持了土壤的湿度,并使营养物质反复循环。于是蕨类定居,草丛长了起来,小灌木出现,直到树木生长,最终形成森林。

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

DOI: 10.5846/stxb201102250215

元伟伟,牛海山,汪诗平,刘艳杰,张立荣. 增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究. 生态学报, 2012, 32(6): 1713-1722.

Qi W W, Niu H S, Wang S P, Liu Y J, Zhang L R. Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1713-1722.

增温对青藏高原高寒草甸生态系统 固碳通量影响的模拟研究

元伟伟^{1,*}, 牛海山¹, 汪诗平², 刘艳杰¹, 张立荣¹

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 2. 西藏大学-中国科学院青藏高原研究所那曲生态环境综合观测研究站, 那曲 852000)

摘要: 低温被广泛认为是高寒草甸生态系统首要限制性因子, 因此增温可能会在某种程度上促进初级生产力, 但是也可能由于土壤水分、N 素营养状况的改变形成新胁迫而抑制生产力提高。此外, 生态系统呼吸由于增温而提高的幅度也可能高于初级生产力提高的幅度, 造成总碳库平衡的改变。利用青藏高原海北高寒草甸实测数据对生态系统过程模型 Biome-BGC (V. 4.2) 进行了参数化, 并利用研究区实测土壤水分 (0—40 cm) 和其它观测数据对模型进行了检验, 证明模型模拟结果较为可靠。模型使用 2005—2008 年的海北气象站实测气象数据包括气温、降水等作为驱动数据, 模拟了增温 1.2—1.7 °C 下青藏高原海北定位站高寒草甸生态系统碳通量的变化, 并整合分析增温试验平台上已发表的试验, 与模拟结果进行对比, 探讨增温对海北高寒草甸生态系统碳收支的可能影响。结果表明: 2005—2008 年青藏高原高寒草甸生态系统为弱的碳汇, 短期增温导致系统净碳固定增加。增温直接影响系统碳通量, 也通过土壤水分和土壤矿化氮变化间接影响碳通量, 相比土壤水分和氮素, 增温对影响碳通量变化过程中的效应更大; 研究也揭示, 在增温条件下, 植物对土壤矿化氮的吸收量小于有机质分解产生的土壤矿化氮量, 土壤矿化氮含量增加。

关键词: Biome-BGC; 增温; 高寒草甸生态系统; NEE; 水分; 氮矿化

Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau

QI Weiwei^{1,*}, NIU Haishan¹, WANG Shiping², LIU Yanjie¹, ZHANG Lirong¹

1 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2 Naqu Ecological and Environmental Observation and Research Station, University of Tibet and Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Naqu 852000, China

Abstract: Low temperature is widely regarded as the most important limiting factor in the alpine meadow ecosystem. The alpine meadow ecosystem represents a huge carbon pool that is witnessing rapid increases in air temperature. While warming may alleviate the low-temperature limitation to primary production, warming may decrease soil moisture by increasing the evaporation level and may stimulate ecosystem respiration. In addition, N may become a limiting factor if primary production enhances. This study focuses on how warming affects the H₂O and N cycles, and how changes in these cycles affects carbon balance. First, the Biome-BGC model (V. 4.2) is parameterized and validated using real time data from the Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences and then this model is used to assess the effects of warming. In the model increasing air temperature was set at 1.2—1.7 °C based on the previous results of the free-air temperature enhancement (FATE) experiment at the station. The simulated results showed warming increases

基金项目: 国家基础性研究项目 (2010CB833502); 国家自然科学基金资助 (30871824)

收稿日期: 2011-02-25; **修订日期:** 2011-06-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qww10072003@yahoo.com.cn

evapotranspiration and decreased soil moisture in the growing seasons, while slightly increasing soil moisture in non-growing season. Warming slightly but significantly increases the litter's decomposition rate, and increases the annual concentration of inorganic N in soil by 7.9%. Warming promoted both gross primary production (GPP) and heterotrophic respiration (R_H). The increases of SLAI (specific leaf area index) and assimilation rates led to increased GPP. The GPP increased by up to 34.3% every year. Because of the enhancement of microbial activity and increased litter input, the warming increased average annual R_H by 17.2%. R_H increased by 24.9% during the non-growing seasons, whereas it only increases by 12.3% due to decreasing water content in soils during the growing seasons. The GPP increase surpassed R_H during the growing seasons. Warming increased annual mean NEE (net absorption) by 29.6%. The results suggest that in the future warming scenario, the alpine meadow ecosystem may remain a weak carbon sink. Warming plays the most important role in the change of carbon flux. Carbon flux is also influenced by water loss caused by warming, and the role of water loss in some processes was prominent. The balance between the effects of warming on litter decomposition and on plant absorbing resulted in increase of soil inorganic N. N availability and H_2O are not limiting factors on plant growth in the short term, but this may change in the long-term; this should be studied further in the future. Comparisons with newly published simulation results related to the Tibetan Plateau are also discussed.

Key Words: BIOME-BGC; warming; meadow ecosystem; NEE; water; inorganic nitrogen

IPCC-AR4^[1]指出大气 CO_2 浓度已从工业革命前期的 280 mL/m^3 上升到目前的 380 mL/m^3 , 并且在 21 世纪末期可能达到 700 mL/m^3 。温室效应对陆地生态系统的影响已成为当今国内外生态学家研究的主要问题之一^[2]。青藏高原高寒草甸生态系统作为最独特的陆地生态系统类型, 在全球气候和碳收支方面起着重要的作用。科学家普遍认为高纬度和高海拔生态系统对温度升高的响应可能更为敏感而迅速^[3-5]。青藏高原平均海拔 4000 m 以上, 被称为世界的第三极, 是全球气候变暖的敏感区域, 也是全球大气温室气体的启动区^[6]。青藏高原增温显著并高于全球增温幅度。Liu 等^[7]对青藏高原海拔 2000 m 以上的 97 个站点气温数据的分析结果表明青藏高原自 19 世纪 50 年代以来增温显著, 每 10a 温度升高 0.32°C , 高于北半球及全球增温速率。青藏高原在全球的碳收支平衡中占有重要的地位。研究表明, 高寒生态系统土壤碳储量较高, 高寒矮嵩草草甸植被下的草毡寒冻锥形土有机质含量极为丰富 (7%—16%), 是碳素的巨大储存库^[8]。王根绪等估计青藏高原草地面积为 $1.6027 \times 10^8\text{ hm}^2$ 的土壤有机碳总量达到 $335.19 \times 10^8\text{ t}$, 平均碳密度达到 6.5 kg/m^2 ^[9]。而青藏高原较为典型的植被类型高寒草甸, 是适应高原隆起与长期低温环境形成的特殊产物, 对增温响应敏感^[10]。基于以上事实, 在全球变化的大背景下, 青藏高原高寒草甸生态系统碳收支会发生什么变化? 增温引起的水分和矿化氮变化又会对生态系统碳收支产生什么影响? 各影响因子在决定碳通量变化中有什么作用? 青藏高原高寒草甸在增温的条件下, 氮是否会成为植物生长的限制性因素? 是当前急待研究的生态学前瞻性课题。

近年来, 已有许多学者对青藏高原生态系统在全球变暖下的响应进行了实验和模拟研究。Klein 等^[11]用 OTC 模拟增温实验对模拟增温对草地质量影响的研究。汪诗平研究组^[12-18]用自由空气红外加热法 (FATE) 研究了气候变化和放牧对青藏高原高寒草甸生态系统温室气体通量影响、土壤可溶性有机碳 (DOC)、凋落物品质以及对高寒草甸植物、植物群落、植物气孔参数的影响。周华坤、李英年等^[10, 19]用 OTC 法研究了增温下矮嵩草草甸生长特征、群落结构及生产量的变化。Wu 等^[20]用 C^{13} 标记法对增温下高寒草甸生态系统碳流通的方式进行了研究。这些观测实验都为从机理方面对增温下海北高寒草甸的变化进行全面的提供了重要的依据。此类观测实验是对特定时间、具体实验对象的真实测量, 而要想把这些观测成果整合起来、置于不同的情景下、去预测生态系统诸多过程的响应, 还需要结合机理模型。目前利用机理 (或半机理) 模型分析研究气候变化如何影响高寒草甸碳过程的报道已有不少^[21-24]。这些模型包括 CENTURY^[22, 24], BIOME-BGC, ORCHIDEE^[21] 及 TEM^[23]。各模型都有各自的优缺点。其中 BIOME-BGC 模型^[25]即生物地球化学循环模型,

利用每日的气候数据和一些关键的气候、植被、位点信息来评估生态系统中碳、氮、水的通量。由于对生态系统过程进行了较全面的考虑,包括碳的生物量积累、水循环、土壤过程、能量过程等,BIOME-BGC 模型被广泛应用于森林、苔原、草地等生态系统过程的模拟。不同模型的模拟结果有许多相似之处,但是由于模型的结构和所设定的参数不同,在某些方面也存在一些差异。例如,在青藏高原土壤有机碳如何响应增温的预测方面,不同研究存在明显差异^[21,23]。对比和评估不同模型预测结果的差异的来源,对于理解预测结果和改进模拟技术都有很大帮助^[26]。另外,这些研究侧重于报道通量或者库(特别是土壤有机碳)的变化结果,而对生态系统其它(特别是水分和氮)过程是如何直接或间接影响碳通量以及碳库的变化并没有进行详细探讨。本研究利用 BIOME-BGC 模型研究了增温条件下海北高寒草甸生态系统碳过程如何对增温进行响应的机理,以及如何通过水分、氮素条件的变化而间接影响碳收支;同时,也在这些方面上与已报道过的实测结果、模拟结果进行对比分析。

1 材料与方法

1.1 研究区

研究区为中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站,该站位于青藏高原东北隅的祁连山谷地,地理位置为北纬 37°29′—37°45′,东经 101°12′—101°23′,海拔 3200 m。该地区位于亚洲大陆腹地,具有明显的高原大陆性气候,东南季风及西南季风微弱。受高海拔条件的制约,气温极低,按气候四季的标准划分,全年皆冬,无明显四季之分,仅有冷暖二季之别,干湿季分明。海北站多年平均气温为-1.6℃,降水量约 560 mm,年日照时间可达 2467.7 h,水面蒸发 1238 mm,空气相对湿度为 67%,平均气压为 691 hPa^[13]。土壤类型为草毡寒冻锥形土,呈微碱性,有机质含量丰富。植被类型以矮嵩草(*Kobresia humilis*)为建群种,主要优势种有垂穗披碱草(*Elymus nutans*)和羊茅(*Festuca ovina*)等。

1.2 研究方法

本研究以海北站实测数据对 BIOME-BGC 进行参数化和校验。在设定的增温情景下分析增温对生态系统碳收支直接影响以及通过水分、氮素改变而施加的间接效应。整合分析增温试验平台上已发表的试验,与模拟结果进行对比,探讨增温对海北高寒草甸生态系统碳收支的可能影响。

1.2.1 模型简介

本研究采用模型模拟的方法研究增温对海北高寒草甸生态系统的影响。采用 4.2 版的 BIOME-BGC^[25]模型。BIOME-BGC 是研究全球和区域气候、干扰和生物地球化学循环间互作的陆地生物地球化学过程模型。模型所需要的生理生态参数涉及生物量分配参数、光合作用参数、气孔导度和气孔控制参数,光及降水截留参数,植物碳氮比,纤维素和木质素含量。模型对于碳的生物量积累方面,采用光合酶促反应机理模型计算出每天的初级生产力 GPP,把生长呼吸和维持呼吸减去后的产物分配给叶、枝条、干和根,其中考虑了叶和细根的生物气候特征;水循环方面,考虑了包括降雨、降雪、冠层截留、穿透降水、树干径流、冠层蒸发、融雪、雪的升华、冠层蒸腾、土壤蒸发、蒸散、地表径流、土壤水分的变化及植物对水分的利用;土壤过程方面,考虑了凋落物分解进入土壤有机碳库过程、土壤有机物矿化过程和水在土壤层间的输送关系;能量过程方面,考虑了净辐射、感热通量、潜热通量;模型还考虑了雪的融化和干扰的效应^[27]。

本研究利用实际观测资料对 BIOME-BGC 模型的参数进行了修正,具体修正的参数值及其来源见表 1。在模型起始阶段,以 2005—2008 年期间中国科学院海北生态系统定位研究站气象站的观测资料为平均气候条件。起始运行大约 1500—1600 年后模型达到平衡态,进入模拟状态。

模拟的时间区段是 2005—2008 年。气象数据是同期中国科学院青藏高原海北定位研究站气象站的逐日数据。增温情景设置为日最高温增加 1.2℃,日最低温增加 1.7℃。同汪诗平等^[12-17, 32]进行的自由空气加热法模拟增温实验设置的增温幅度一致。

1.2.2 数据分析方法

本研究采用 SPSS 16.0 软件对模拟结果进行统计分析。对于模型输出的水分、土壤矿化氮、碳等变量,每

一个时间点上的两个值(增温 VS 不增温)是一个配对。用配对 *t* 检验(Paired Samples *T*-Test)对模拟输出的增温与不增温变量结果进行分析,样本数量为 1460。

表 1 模型参数设定
Table 1 Model parameters

参数 Parameters	设定值 Value	来源 Source
有效土体厚度 Effective soil thickness/m	1	[28]
土壤砂粒、壤粒粘粒比例 Soil sand and clay particles proportion/%	27.3、46.2、26.5	[29]
短波辐射反射率 Shortwave radiation reflectivity	0.23	[19]
N(干+湿)沉降率 Nitrogen (dry+wet) deposition rate/(kg N·m ⁻² ·a ⁻¹)	0.0013	[30]
叶片 C/N 比 Leaves C/N ratio	15.8	项目组自测
新光合同化物地下/地上分配比 Underground / ground distribution ratio of new assimilation product	1.5	[20]
最大气孔导度 Maximum stomatal conductance/(m/s)	0.008	[31]

2 结果与分析

2.1 模拟结果的检验

在模拟的时间区段内,土壤含水量有连续观测值,可用于检验模拟结果(图 1)。预测值与模拟值达到极显著的相关,并且在 1:1 线周围均匀分布,说明模型可以较好地反映土壤含水量变化特征。需要指出的是,两者不可能完全吻合,因为模拟值是有效土体厚度(1 m)水分含量的平均值,实测值是 0—40 cm 深度、4 个观测水平(10、20、30、40 cm)的土壤含水量的平均值。表层土壤水分含量变化比深层更剧烈一些,波动幅度更大^[33]。但是两者(即 0—100 cm 和 0—40 cm)的动态趋势应该具有很高的相似性,表层土水动态很大程度上代表了整个土层的趋势。在图 1 中,实测值(因为是表层的平均)比预测值变化幅度要大,这是合理的。因此,从土壤水分变化角度看,模拟结果较为可靠。

另外,模型模拟结果同部分观测试验结果数据对比(表 2)显示,模拟结果较为可靠。

2.2 水分

(1) 土壤水分

模拟结果表明,增温显著影响土壤水分的变化($P < 0.001$),生长季土壤水分下降更加明显。2007、2008 年降雨量较少,土壤水分在生长季的降低更加剧烈。非生长季土壤水分在增温作用下略有增加,但是在 2008 年有降低的趋势,这可能与该年非生长季降雨量较少(仅为 26.2 mm)有关。

(2) 蒸发

生态系统蒸发(图 2)是土壤蒸发、冠层蒸发、雪被升华的合计,理论分析和观测试验结果都表明在全球的尺度上,增温很可能会造成蒸发的增加^[37]。模拟结果表明,增温对蒸发并没有产生显著影响($P = 0.87$)。可能是因为模型对雪被升华的估计偏低引起的。尚无观测数据证明这一点,但是一些试验照片(图 3)上可以看出非常明显地增温使非生长季积雪升华较对照高。模拟结果中增温使雪被升华增加,但没有达到统计上的显著水平。

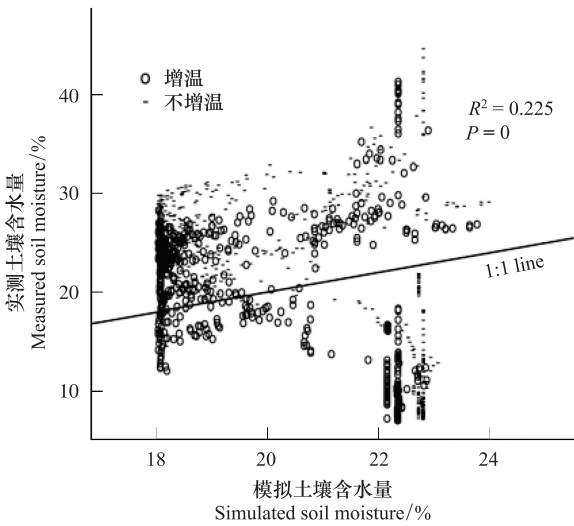


图 1 BIOME-BGC (V. 4. 2) 模拟(0—100 cm)土壤含水量与(0—40 cm)实测值对比(R^2 :决定系数)

Fig. 1 Comparison of simulated (0—100 cm) and measured (0—40 cm) soil moisture by BIOME-BGC(V. 4. 2)

表 2 模拟结果与观测试验对照表

Table 2 Value from model simulation and experiment measuring

对象 Object	模型模拟 Model simulation	试验观测 Experimental observation
土壤含水量 Soil moisture	显著降低土壤水分含量	FATE 试验 2006—2007 年增温并没有对土壤水分产生显著影响,但是在某些月份显著降低土壤水分;随后两年的增温对土壤湿度的影响显著 ^[34]
土壤矿化氮 Soil mineralized nitrogen	增加 7.9% /a	无明显统一的变化趋势 ^[32]
微生物活性 Microbial activity	增加 37.6% /a	温度随海拔降低而升高将导致土壤微生物活动加速 ^[35]
异养呼吸 Heterotrophic respiration	增加 17.2% /a, R_H 呈现非生长季增幅大于生长季增幅的格局。非生长季 R_H 增加了 24.9%, 生长季 R_H 仅增加了 12.3%	两年增温使凋落物分解增加了 19.3% ^[15] ; 不同海拔移栽增温试验中,同 3800 m 相比,3200 m 和 3600 m 海拔处样地凋落物年降解量分别增加 15.0% 和 12.6% (3200 m、3600 m、3800 m 海拔 5cm 平均土壤温度分别为 3.2 °C、2.4 °C、0.2 °C) ^[15]
生态系统呼吸 Ecosystem respiration	增加 24.5% /a	土壤温度每升高 1 °C,该地区高寒草甸生态系统呼吸累积增加 34.9% ^[32]
土壤碳氮比 Soil carbon and nitrogen ratio	10.03	介于 6—14 之间 ^[35]
净初级生产力 NPP	18.5% /a	1 年模拟增温结果显示禾草地上生物量增加了 12.3% ^[36]
净生态系统交换 NEE	生长季平均 CO ₂ 净吸收的总量为 361 g CO ₂ /m ²	整个生长季 CO ₂ 净吸收的总量达 583 g CO ₂ /m ² ^[33]

(3) 蒸腾

增温显著增加了植物蒸腾 ($P < 0.001$), 并且增幅在年季间有增加的趋势。在生长季 5—10 月增温使蒸腾作用增加明显, 并且在 8 月左右达到高峰, 这可能是由于此时植物面积最大 (8—9 月植物叶面积达到最大值), 蒸腾面积增大引起的。

2.3 土壤矿化氮

模拟表明, 增温显著影响土壤矿化氮量 ($P < 0.001$), 土壤年均矿化氮增加了 7.9% /a。土壤矿化氮水平在每年的 6 月份达到最大值后下降, 这可能与模拟地区在 5、6 月份气温回升较大有关。在海北站地区, 5 月中旬日均气温稳定通过 3 °C 左右时进入返青期^[38]。增温使温度更接近微生物活动的最适温度, 促进了凋落物的分解使进入土壤的氮迅速增加, 而后随着植物生长, 土壤中的氮又被植物吸收利用而迅速降低。冬季气温较低, 凋落物的降解量较少, 输出大于输入, 土壤矿化氮减少。在不同海拔梯度移栽的增温试验中, 海拔高度和试验样点显著影响各层次 (0—30 cm) 土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和总无机氮 (NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N) 的含量。但沿不同的海拔梯度土壤无机氮含量并没有明显而统一的增加或降低的趋势^[32]。短期培养试验表明, 短期增温总体上增加了土壤表层 (0—20 cm) 无机氮含量^[32]。3a 的移栽试验结果表明增温对土壤 (0—30 cm) 各种无机氮含量的影响受试验样点和海拔高度的显著影响。但没有较为明显且统一的变化趋势^[32]。

2.4 碳

2.4.1 碳同化

模拟结果表明增温使年平均总初级生产力 (GPP) 增加了 34.3%, 在生长季时期 GPP 增幅最大。无论是照光叶片还是遮阴叶片 (能接收到太阳直接辐射的为照光叶片, 不能接受到直接辐射的为遮阴叶片) 的投影叶面积和同化速率在增温作用下都显著增加了。在海北高寒草甸生态系统开展的增温试验的前两年, 发现模

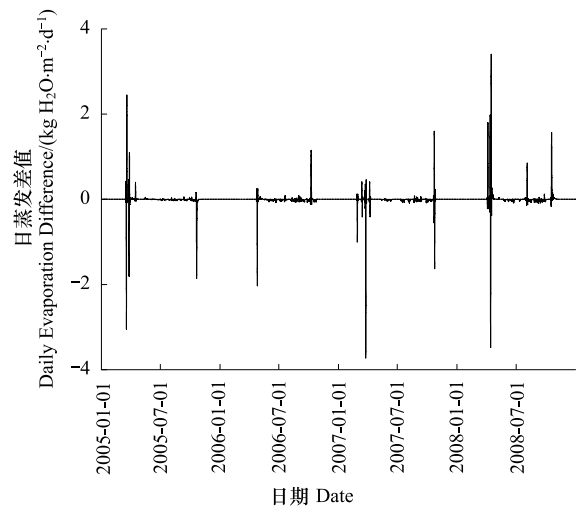


图 2 增温对蒸发的影响

Fig. 2 Effects of warming on evaporation

图中各点值为增温后的蒸发减去对照的蒸发

拟增温后植物生物多样性增加,初级生产量大幅度增加^[39]。在海北站 1a 模拟增温结果显示禾草地上生物量增加了 12.3%^[36]。FATE 试验中,增温显著增加了牧草的生长速率,显著增加了地上净初级生产力 (ANPP)^[34],并显著增加了 0—10 cm 地下生物量^[17]。但 Klein 等^[11] 1997 年在该区域进行的增温剪草试验却发现增温使草甸位点的地上净初级生产力 (ANPP) 降低了 40 g·m⁻²·a⁻¹。

2.4.2 碳释放

模拟发现,增温使异养呼吸 (R_H) 提高了 17.2%,并且年际间有微弱的加剧趋势 (图 5)。在非生长季,增温使 R_H 增加了 24.9%,主要是因为温度较低的冬季,温度是生态系统各生理活动的限制性因素,增温以及非生长季增温时土壤水分的增加,都有利于微生物进行分解作用 (模拟结果表明增温使微生物活性增加了 37.6%)。而在生长季内,增温使 R_H 仅仅增加了 12.3%,这可能是因为生长季气温较高,温度不是植物生长的限制因子,而增温引起的水分亏损在生长季却更加剧烈,水分成为限制异养呼吸的主要因素。相关观测实验也得出了类似的结果。FATE 试验进行的两年间增温使凋落物分解增加了 19.3%^[17]。不同海拔移栽增温试验结果也表明,各类高寒草甸生态系统呼吸均随着温度的增加而增加^[32]。 R_H 变化还跟土壤碳氮比有关。

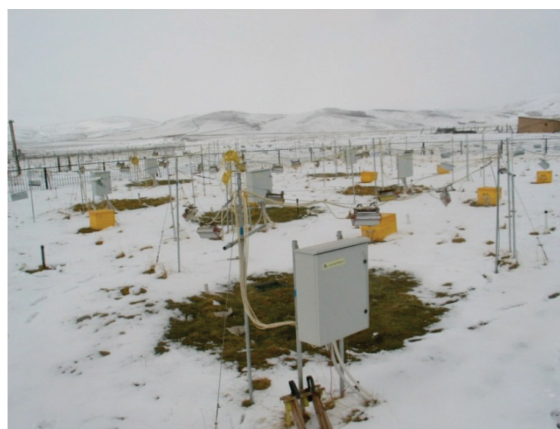


图3 FACE 试验样地照片

Fig.3 Picture from FACE

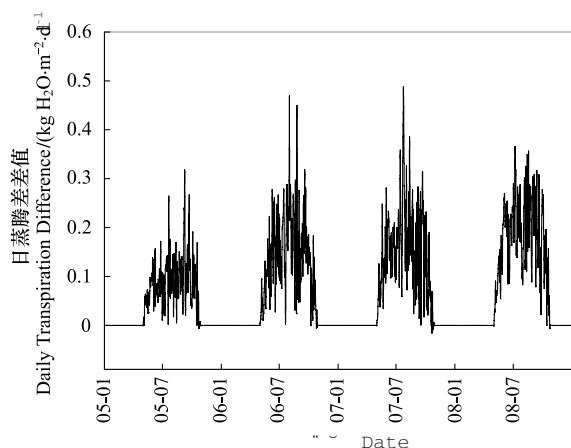


图4 增温对蒸腾的影响

Fig. 4 Effects of warming on transpiration

图中各点值为增温后的蒸腾减去对照的蒸腾

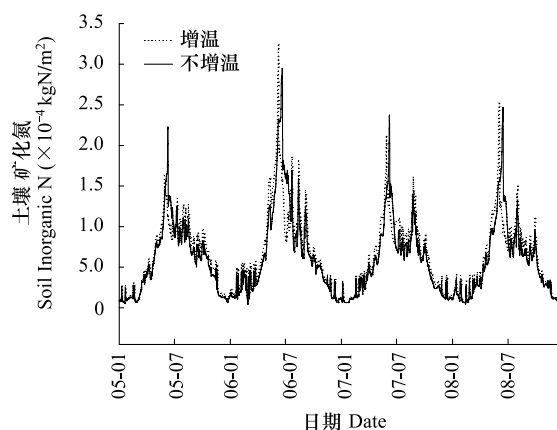


图5 增温对土壤矿化氮的影响

Fig. 5 Effects of warming on soil inorganic N

对于土壤碳氮比,海北站高寒草甸土壤碳氮比介于 6—14 之间^[35],相对较低,利于土壤腐殖质化和有机氮矿化。模拟表明土壤碳氮比为 10.03。土壤碳氮比呈现生长季低非生长季高的格局。在生长季,植物生长从土壤中吸收矿化氮,使土壤氮含量降低。而由于土壤呼吸碳释放强烈,土壤碳降低。土壤氮较土壤碳降低得更加剧烈,所以土壤碳氮比低。而在非生长季,由于植物凋萎,土壤有机氮输出少,土壤碳较土壤氮降低得更加剧烈,土壤碳氮比较大。增温使土壤碳氮比在生长季降低,这是由于增温使生长季土壤呼吸加剧,减少了土壤中的碳含量。增温显著降低土壤碳氮比 ($P < 0.0001$),并且年季间增幅有上升趋势 (图 7)。

2.4.3 净生态系统碳交换

净生态系统碳交换 (NEE) 的在生长季与非生长季的变化,分别与 NPP 和 R_H 的变化相对应 (图 8)。在生

长季,由于植物光合作用积累的碳大于生态系统呼吸释放的碳,NEE 表现为生态系统对碳的净吸收;非生长季时期植物地上部分凋萎光合作用停止,生态系统呼吸决定 NEE,NEE 表现为净释放,并同 R_H 的变化一致。模拟结果表明,增温下高寒草甸生态系统系统 NEE 增加了 29.6%。

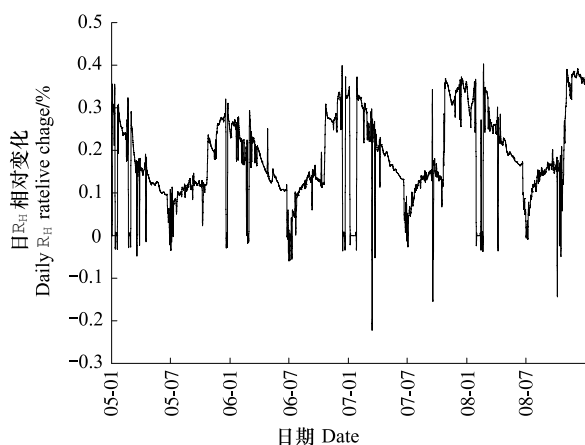


图6 增温对异养呼吸的影响

Fig. 6 Effects of warming on R_H

相对变化量 = $(R_{HW} - R_{HNW}) \times 2 / (R_{HW} + R_{HNW})$, 其中 R_{HW} 和 R_{HNW} 分别为增温与不增温下的异养呼吸

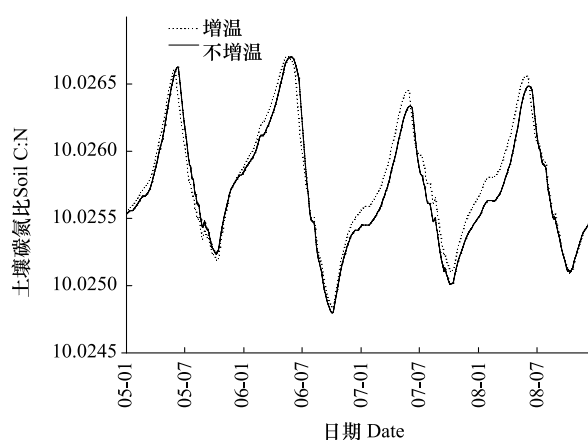


图7 增温对土壤碳氮比的影响

Fig. 7 Effects of warming on soil C:N

3 讨论

(1) 增温对土壤水分的影响

由于观测试验对生态系统水分蒸发蒸腾进行的观测较少,本研究只能选取其中少量和模拟时段同时期的观测结果进行对比。BIOME-BGC 也模拟到增温 1.2—1.7℃ 使土壤水分在生长季下降。FATE 试验表明,2006 年和 2007 年,增温对 0—10、10—20 cm 土壤湿度的影响不显著,但显著降低了 20—30 cm 土壤 6 月中旬以前的湿度;但在干旱的 2008 年,增温显著地降低了 10 cm 土壤湿度^[34]。随后两年的增温对土壤湿度的影响显著($P = 0.014$),土壤湿度的年际变化和月变化以及不同土壤深度的变化都极显著($P < 0.001$)^[17]。利用其他生态系统过程模型如 ORCHIDEE^[21] 和 TEM^[23] 对青藏高原地区进行增温模拟的研究中也看到了 NPP、 R_H 上升以及土壤水分下降的结果。系统水分蒸散和土壤水分的减少是一致的,是增温的直接效应。

在北海高寒草甸生态系统的某些时间段的一些生理过程中,水分超过增温起主导作用。例如,异养呼吸增温作用下增加的,但是生长季增加速率却低于非生长季,这是由于生长季增温使系统水分散失更加剧烈,分解作用由于缺水受到限制。胡宜刚^[32] 也指出土壤温度能解释该地区高寒草甸生态系统呼吸 60%—68% 的变异。虽然土壤温度对高寒草甸生态系统呼吸的影响比湿度更大,高寒草甸生态系统呼吸主要由土壤温度控制。但是在生长季时期气温较高,温度不再是植物生长的限制性因素,增温引起的水分亏损限制了凋落物的分解。

(2) 增温对土壤矿化氮的影响

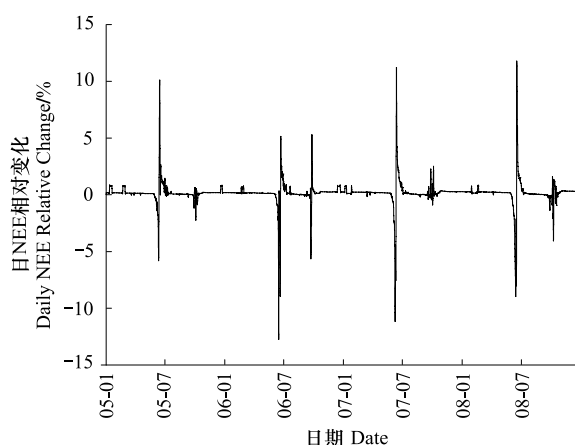


图8 增温对 NEE 的影响

Fig. 8 Effects of warming on NEE

相对变化量 = $(NEE_w - NEE_{NW}) \times 2 / (NEE_w + NEE_{NW})$, 其中 NEE_w 和 NEE_{NW} 分别为增温与不增温下的 NEE

增温直接或间接影响土壤氮矿化率。一方面,增温直接影响土壤氮矿化率。增温通过增加微生物活性,加快生化反应速率,加速凋落物的分解,使土壤矿化氮增加。另一方面,增温通过影响土壤碳氮比变化间接影响土壤氮矿化率。模拟地区土壤碳氮比在 10—13 之间,土壤碳氮比降低,分解作用会由于碳源不足,而阻碍矿化氮形成。2005—2008 年,土壤氮矿化率是土壤碳氮比增加的正效应和增温对氮矿化促进的正效用共同作用的结果。

在没有系统外施加氮的下,长期碳固定的增加必然会带来系统的氮限制^[40]。Luo 等^[41]的逐步氮限制假说(Progressive N Limitation, PNL)认为 CO₂ 浓度增加,系统碳输入增多的时候,植物将会需要更多的氮供合成同化产物,因此会将更多的氮固定到植物生物量和土壤有机质库中,在没有外界施加氮的情况下,土壤中的有效氮含量减少将会成为植物生长的限制因素。温度增加也会同样产生类似的效果。增温引起的碳同化的增加,同样需要植物从土壤中吸收更多的氮来进行有机物的合成。这会使土壤中有效氮更多地转移到植物中,氮再随凋落物进入土壤。在微生物分解作用下,部分有机氮降解形成有效氮,可被植物吸收利用。未经分解的部分有机物形成土壤有机质进入土壤有机质库。但是同单纯地增加 CO₂ 浓度不同的是,增温同时还会增加有机质的分解,使更多有机氮分解为植物可利用的矿化氮。因此,土壤净矿化氮是植物吸收的矿化氮和有机质分解产生的矿化氮权衡的结果。增温 1.2—1.7℃,BIOME-BGC(V. 4.2)模拟的结果是使年平均土壤矿化氮增加 7.9%(图 5)。说明在增温下,有机质分解高于植物对氮的吸收。Zhuang 等^[23]利用 TEM 模拟增温得到的结果也是增温使土壤矿化氮增加。

(3) 增温对碳收支的影响

增温对 GPP 与 R_e 促进的相对程度,决定了土壤碳库变化方向。在增温 1.2—1.7℃ 的条件下,BIOME-BGC(V. 4.2)模拟的结果是 GPP 增加程度超过 R_e 的增加幅度,使土壤碳库微弱增加。Zhuang 等^[23]与 Tan 等^[21]都模拟到了增温条件下土壤水分的下降,但是水分胁迫对 GPP 影响的程度是不同的。Zhuang 等^[23]文中土壤水分含量下降对 GPP 抑制作用不足以超过增温的直接促进作用以及 N 矿化增加对 GPP 的促进作用;而在 Tan 等^[21]文中,温度造成的干燥化使得青藏高原很多栅格内 GPP 升高幅度低于生态系统呼吸提高幅度,因此土壤碳库降低。本文的研究结果更接近 Zhuang 等^[23]。当然,这些模拟研究在时间跨度、增温情景设定方面也不同。本研究模拟的时间跨度是 2005—2008 年。

(4) 从各变量变化趋势看,长期模拟增温结果可能与短期不同,这还有待于进一步分析。长期的增温下,生态系统碳的变化并不一定与短期增温相同。赵新全等^[39]指出在该地区开展的增温实验的前两年,发现模拟增温后植物生物多样性增加,初级生产量大幅度增加。但是温度的提高导致土壤干旱化,在实验的第 3 年初级产量开始大幅度下降,生物多样性指数也在降低。另外,长期温度改变中,植物群落结构改变(演替)对生态系统过程的影响不容忽视^[37],BIOME-BGC(V. 4.2)当前版本以及 Zhuang 等^[23]使用的 TEM 和 Tan 等^[21]使用的 ORCHIDEE 还没有把动态植被模型包括进来。如果用于进行长期模拟,这是一个需要改进的方面。

研究表明短期模拟增温下青藏高原海北站高寒草甸生态系统碳同化是增温、土壤有效氮增加的正效应和水分亏损的负效应共同作用的结果。碳释放是受增温的正效应、水分亏损的负效应共同作用。增温在各影响因子中起主导作用。增温引起的水分亏损对 GPP 的抑制作用弱于增温对光合作用和矿化氮的正效应对 GPP 的促进作用。增温使土壤矿化氮增加,氮在短期内不会成为植物生长的限制因素。各变量的长期变化趋势还有待研究。

致谢: 中国科学院研究生院王艳芬、胡正义、崔晓勇、张娜、程淑兰等老师对本研究给予帮助,中国科学院西北高原生物研究所赵新全、李英年老师对收集资料给予支持,特此致谢。

Reference:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. The Fourth Assessment Report of Working Group. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Fu B J, Niu D, Zhao S D. Global change and terrestrial ecosystems: Review and Prospect. Earth Sciences, 2005, 20(5):556-560.

- [3] Chapin F S III, Jefferies R L, Reynolds J F, Shaver G R, Svoboda J, Chu E W. Arctic Ecosystems in a Changing Climate: An Ecophysiological Perspective. San Diego: Academic Press, 1992: 441-452.
- [4] Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. Climate effects of mountain plants. Nature, 1994, 369: 448-450.
- [5] Körner C. Response of alpine vegetation to global climate change// International Conference on Landscape Ecological Impact of Climate Change. Lunteren: Catena Verlag, 1992, 22: 85-96.
- [6] Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, Hu Q W, Zhao X Q. Alpine meadow air-soil-vegetation-animal system carbon storage and carbon cycle. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(4): 627-634.
- [7] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. Climatology, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [8] Zhao L, Xu S X, Fu Y L, Gu S, Li Y N, Wang Q X, Du M Y, Zhao X Q. Snow effect on CO₂ alpine and water vapor flux on meadow in northern Tibet. Acta Agrestia Sinica, 2007, 13(3): 242-247.
- [9] Wang G X, Cheng G D, Shen Y P. Plateau grassland soil organic carbon pool and its global significance. Glaciology, 2002, 24(6): 693-700.
- [10] Li Y N, Zhao L, Zhao X Q, Zhou H K. Effects of a 5-years mimic temperature increase to the structure and productivity of *kobresia humilis* meadow. Acta Agrestia Sinica, 2004, 12(3): 236-239.
- [11] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau. Ecology Letters, 2004, 7(12): 1170-1179.
- [12] Kimball B A, Conley M M, Wang S P, Lin X W, Luo C Y, Morgan J, Smith D. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. Global Change Biology, 2008, (14): 309-320, doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01486.x.
- [13] Lin X W. Green house gas fluxes effected by warming and land use change on the Tibetan Plateau Alpine Meadow Ecosystem [D]. Xining: Northwest Plateau Institute of Biology; Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [14] Lin X W, Wang S P, Ma X Z, Xu G P, Luo C Y, Li Y N, Jiang G M, Xie Z B. Fluxes of CO₂, CH₄, and N₂O in an alpine meadow affected by yak excreta during summer grazing periods on the Qinghai-Tibetan plateau. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(4): 718-725.
- [15] Luo C Y, Xu G P, Chao Z G, Wang S P, Lin X W, Hu Y G, Zhang Z H, Duan J C, Chang X F, Su A L, Li Y N, Zhao X Q, Du M Y, Tang Y H, Kimball B A. Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass loss on the Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2009, 16(5): 1606-1617.
- [16] Wang S P, Yang X X, Lin X W, Hu Y G, Luo C Y, Xu G P, Zhang Z H, Su A L, Chang X F, Duan J C, Chao Z G. Methane emission by plant communities in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau; a new experimental study of alpine meadows and oat pasture. Biology Letters, 2009, 5(4): 535-538.
- [17] Luo C Y. Effect of Warming and Land Use on Net Carbon Exchange in (NEE) Different Alpine Meadow Ecosystem [D]. Xining: Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [18] Zhang L R. Responses of stomatal parameter to warming and grazing in four species in Alpine Meadow [M]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [19] Li Y N, Zhao L, Gu S, Du M Y, Yu G R, Tang Y H, Kato T, Wang X Q, Zhao X Q. Energy-balance features of the alpine meadows on the haibei area (northern shores of the Qinghai lake). Acta Agrestia Sinica, 2003, 11(4): 289-295.
- [20] Wu Y B, Tan H C, Deng Y C, Wu J, Xu X L, Wang Y F, Tang Y H, Teruo H, Cui X Y. Partitioning pattern of carbon flux in a *Kobresia* grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau revealed by field ¹³C pulse-labeling. Global Change Biology, 2010, 16(8): 2322-2333.
- [21] Tan K, Philippe C, Piao S L, Wu X P, Tang Y H, Nicolas V, Liang S, Fang J Y. Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai-Tibetan grasslands. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24, doi:10.1029/2009GB003530.
- [22] Zhang Y Q, Tang Y H, Jiang J. Qinghai-Tibet Plateau grassland soil organic carbon dynamics. Science in China, 2006, 32(12): 1140-1147.
- [23] Zhuang Q, He J, Lu Y, Ji L, Xiao J, Luo T. Carbon dynamics of terrestrial ecosystems on the Tibetan Plateau during the 20 th century: an analysis with a process-based biogeochemical model. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19(5): 649-662.
- [24] Li D, Huang Y, Wu Q, Ming Z, Jin D Y. Modeling dynamics of soil organic carbon in an alpine meadow ecosystem on Qinghai-Tibetan Plateau using the Century model. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(2): 160-168.
- [25] Thornton P E. Regional ecology simulation: combining surface- and satellite-based observations to study linkages between terrestrial energy and mass budgets [D]. Missoula: University of Montana, 1998.
- [26] Ľupek B, Zanchi G, Verkerk P J, Churkina G, Viovy N, Hughes J K, Lindner M. A comparison of alternative modeling approaches to evaluate the European forest carbon fluxes. Forest Ecology and Management, 2010, 260(3): 241-251.
- [27] Wang C, Yan X D, Huang Y, Liu H Z. With BIOME-BGC model on the latent heat fluxes of the typical ecosystem: simulations in semi-arid area at Tongyu, Jilin Province. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(3): 404-412.
- [28] Wu Q, Cao G M, Hu Q W, Li D, Wang Y S, Li Y M. A primary study on CO₂ emission from soil-plant systems of *kobresia humilis* meadow. Resources Science, 2005, 27(2): 96-102.
- [29] Yu G, Lu C X, Xie G D. Soil conservation capacity of alpine meadow ecosystem and its economic value in the northern Qinghai Tibetan Plateau. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4): 57-61.
- [30] Zhu T H, Cheng S L, Fang H J, Yu G R, Zheng J J, Li Y N. Early responses of soil CO₂ emission to simulating atmospheric nitrogen deposition in an alpine meadow on the Qinghai Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(10): 2687-2696.
- [31] Bi G Y, Han F. Alpine meadow plant leaf temperature, diffusion conductance, transpiration and water potential. Acta Ecologica Sinica, 1993, 13(4): 369-372.

- [32] Hu Y G. Effects of climate change and grazing on greenhouse gas fluxes in the Tibetan Plateau Alpine meadow ecosystem [D]. Xining: Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [33] Xu S X, Zhao X Q, Li Y N, Zhao L, Cao G M, Tang Y H, Gu S, Wang X Q, Du M Y. Carbon dioxide exchange during growing season and dormant season of an alpine shrub on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science in China Ser. D*, 2004, 341(II):118-124.
- [34] Xu G P. Responses and adaptations of plant and plant community to warming and grazing on the alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau [D]. Xining: Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [35] Xue X J, Li Y N, Du M Y, Liu A H, Zhang F W, Wang J L. Soil organic matter and total nitrogen changing with altitudes on the southern foot of eastern Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(4):642-649.
- [36] Zhou H K, Zhou X M, Zhao X Q. A preliminary study of the influence of simulated greenhouse effect on a *kobresia humilis* meadow. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 25(4):547-553.
- [37] Bond-Lamberty B, Gower S T, Ahl D E, Thornton P E. Reimplementation of the Biome-BGC model to simulate successional change. *Tree Physiology*, 2005, 25(4):413-424.
- [38] Pu J Y, Li Y N, Zhao L, Yang S H. The relationship between seasonal changes of *kobresia humilis* meadow biomass and the meteorological factors. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, 1(13):238-241.
- [39] Zhao X Q, Chen S L, Cao G M, Shi S B, Xu S X, Wang Q L. Study on interacting mechanisms of alpine meadow ecosystem with global change in Tibetan Plateau. *Science Technology and Industry*, 2003, 3(8):51-59.
- [40] Diaz S, Grime J P, Harris J, McPherson E. Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated CO₂. *Nature*, 1993, 364:616-617, doi:10.1038/364616a0.
- [41] Luo Y Q, Field C B, Jackson R B. Does nitrogen constrain carbon cycling, or does carbon input stimulate nitrogen cycling?. *Ecology*, 2006, 87: 3-4, doi:org/10.1890/05-0923.

参考文献:

- [2] 傅伯杰, 牛栋, 赵士洞. 全球变化与陆地生态系统研究: 回顾与展望. *地球科学*, 2005, 20(5): 556-560.
- [6] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 胡启武, 赵新全. 高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环. *生态学报*, 2003, 23(4): 627-634.
- [8] 赵亮, 徐世晓, 伏玉玲, 古松, 李英年, 王勤学, 杜明远, 赵新全. 积雪对藏北高寒草甸 CO₂ 和水汽通量的影响. *草地学报*, 2007, 13(3): 242-247.
- [9] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 693-700.
- [10] 李英年, 赵亮, 赵新全, 周华坤. 5 年模拟增温后矮嵩草草甸群落结构及生产量的变化. *草地学报*, 2004, 12(3): 236-239.
- [13] 蔺兴武. 增温与土地利用变化对青藏高原高寒草甸生态系统温室气体通量影响的研究. 西宁: 中国科学院西北高原生物研究所, 2008.
- [17] 罗彩云. 增温和不同土地利用方式对高寒草甸生态系统净碳交换 (NEE) 特征影响的研究. 西宁: 中国科学院西北高原生物研究所, 2010.
- [18] 张立荣. 增温、放牧对海北高寒草甸植物气孔参数的影响. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [19] 李英年, 赵亮, 古松, 杜明远, 于贵瑞, 唐艳鸿, 加藤知道, 王勤学, 赵新全. 海北高寒草甸地区能量平衡特征. *草地学报*, 2003, 11(4): 289-295.
- [24] 李东, 黄耀, 吴琴, 明珠, 靳代樱. 青藏高原高寒草甸生态系统土壤有机碳动态模拟研究. *草业学报*, 2010, 19(2): 160-168.
- [27] 王超, 延晓冬, 黄耀, 刘辉志. 应用 BIOME-BGC 模型研究典型生态系统的潜热通量——半干旱地区吉林通榆的模拟. *气候与环境研究*, 2006, 11(3): 404-412.
- [28] 吴琴, 曹广民, 胡启武, 李东, 王跃思, 李月梅. 矮嵩草草甸植被-土壤系统 CO₂ 的释放特征. *资源科学*, 2005, 27(2): 96-102.
- [29] 于格, 鲁春霞, 谢高地. 青藏高原北缘地区高寒草甸土壤保持功能及其价值的实验研究. *北京林业大学学报*, 2006, 28(4): 57-61.
- [30] 朱天鸿, 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 郑娇娇, 李英年. 青藏高原高寒草甸土壤 CO₂ 排放对模拟氮沉降的早期响应. *生态学报*, 2011, 31(10):2687-2696.
- [31] 贲桂英, 韩发, 师生波. 高寒矮嵩草草甸植物温度叶扩散导度、蒸腾作用与水势. *生态学报*, 1993, 13(4): 369-372.
- [32] 胡宜刚. 气候变化和放牧对青藏高原高寒草甸生态系统温室气体通量影响的研究. 西宁: 中国科学院西北高原生物研究所, 2010.
- [33] 徐世晓, 赵新全, 李英年, 赵亮, 曹广民, 唐艳鸿, 古松, 王勤学, 杜明远. 青藏高原高寒草甸生长季和非生长季 CO₂ 通量分析. *中国科学 D 辑, 地球科*, 2004, 34(11):118-124.
- [34] 徐广平. 高寒草甸植物和植物群落对增温和放牧的响应与适应研究. 西宁: 中国科学院西北高原生物研究所, 2010.
- [35] 薛晓娟, 李英年, 杜明远, 刘安花, 张法伟, 王建雷. 祁连山东段南麓不同海拔土壤有机质及全氮的分布状况. *冰川冻土*, 2009, 31(4): 642-649.
- [36] 周华坤, 周兴民, 赵新全. 模拟增温效应对矮嵩草草甸影响的初步研究. *植物生态学报*, 2000, 24(5):547-553.
- [38] 蒲继延, 李英年, 赵亮, 杨时海. 矮嵩草草甸生物量季节动态及其与气候因子的关系. *草业学报*, 2005, 1(3): 238-241.
- [39] 赵新全, 陈世龙, 曹广民, 师生波, 徐世晓, 王启兰. 青藏高原高寒草甸生态系统与全球气候变化的相互作用机理研究. *科技和产业*, 2003, 3(8): 51-59.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 6 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Quantitatively monitoring undergoing degradation of plateau grassland by remote sensing data; a case study in Maqu County, Gansu Province, China	ZHOU Jianhua, WEI Huaidong, CHEN Fang, et al (1663)
Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China	YIN Xuwang, QU Xiaodong, LI Qingnan, et al (1677)
Water-holding capacity of an evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain and its functions in mitigating the effects of Southwest China drought	QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (1692)
The relationship between protistan community and water quality along the coast of Qingdao	YANG Jinpeng, JIANG Yong, HU Xiaozhong (1703)
Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau	QI Weiwei, NIU Haishan, WANG Shiping, et al (1713)
Features of leaf photosynthesis and leaf nutrient traits in reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir, China	JIE Shenglin, FAN Dayong, XIE Zongqiang, et al (1723)
Spatio-temporal distribution of fish in the Pengxi River arm of the Three Gorges reservoir	REN Yuqin, CHEN Daqing, LIU Shaoping, et al (1734)
Analysis on allelochemicals in the cell-free Filtrates of <i>Amphidinium carterae</i>	JI Xiaoqing, HAN Xiaotian, YANG Baijuan, et al (1745)
Effect of starvation on expression patterns of the MYP gene in <i>Strongylocentrotus intermedius</i>	QIN Yanjie, SUN Bolin, LI Xia, et al (1755)
Habitat selection of feral yak in winter and spring in the Helan Mountains, China	ZHAO Chongnan, SU Yun, LIU Zhensheng, et al (1762)
Using cellular automata to study patchy spread in a predator-prey system	YANG Li, LI Weide (1773)
Effects of insect-resistant transgenic <i>Bt</i> rice with a fused <i>Cry1Ab+Cry1Ac</i> gene on population dynamics of the stem borers, <i>Chilo suppressalis</i> and <i>Sesamia inferens</i> , occurring in paddyfield	LI Zhiyi, SUI He, XU Yanbo, et al (1783)
Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of <i>Frankliniella Occidentalis</i> (Pergande)	FAN Fan, REN Hongmin, LU Lihua, et al (1790)
The synergistic action and UV protection of optical brightener on three different geographic isolates of Asian Gypsy Moth Nucleopolyhedrovirus (LdMNPV)	WANG Shujuan, DUAN Liqing, LI Haiping, et al (1796)
The availability of trace elements in an oasis soil under different utilization intensity in an arid area in China	LI Haifeng, ZENG Fanjiang, GUI Dongwei, et al (1803)
Multivariate regression analysis of greenhouse gas emissions associated with activities and populations of soil microbes in a double-rice paddy soil	QIN Xiaobo, LI Yu'e, SHI Shengwei, et al (1811)
Distribution characteristics of humus fraction in soil profile for the typical regions in the Loess Plateau	DANG Ya'ai, LI Shiqing, WANG Guodong (1820)
N ₂ O emissions from vegetable farmland with purple soil and the main factors influencing these emissions	YU Yajun, WANG Xiaoguo, ZHU Bo (1830)
Relationships between carbon source utilization of soil microbial communities and environmental factors in natural secondary forest in subtropical area, China	WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1839)
Numerical soil classification using fuzzy K-means algorithm and predictive soil mapping at regional scale	LIU Pengfei, SONG Xuan, LIU Xiaobing, et al (1846)
Releasing characteristics of nonpoint source pollutants from straws under submerging condition	YANG Zhimin, CHEN Yucheng, ZHANG Yun, et al (1854)
Effects of delayed irrigation at jointing stage on nitrogen accumulation and its allocation, and NO ₃ -N migration in wheat	WANG Hongguang, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (1861)
Risk division on winter wheat suffering from spring wet damages in Jiangsu Province	WU Hongyan, GAO Ping, XU Weigen, et al (1871)
Determination of the initial depth of water uptake by roots of steppe plants in restored and overgrazed communities, Inner Mongolia, China	GUO Yuran, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1880)
Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (1888)
Numerical analysis of inter-specific relationships in Alpine steppe community in Bayanbulak	FANG Fei, HU Yukun, ZHANG Wei, et al (1898)
Analysis of shade-tolerance and determination of evaluation indicators of shade-tolerance in seedlings of <i>Chrysanthemum grandiflorum</i> and its closely related genera	SUN Yan, GAO Haishun, GUAN Zhiyong, et al (1908)
Effect of the parasitic <i>Cuscuta australis</i> on the community diversity and the growth of <i>Alternanthera philoxeroides</i>	WANG Rukui, GUAN Ming, LI Yonghui, et al (1917)
Diversity and community structure of basidiomycete laccase gene from subtropical broad-leaved and coniferous forest ecosystems based on cDNA cloning	CHEN Xiangbi, SU Yirong, HE Xunyang, et al (1924)
Fine root longevity and controlling factors in subtropical <i>Alingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (1932)
Linear programming and optimal distribution of the forest resources based on TM remote sensing images	DONG Bin, CHEN Liping, WANG Ping, et al (1943)
Urban green space landscape patterns and thermal environment investigations based on computational fluid dynamics	LIU Yanhong, GUO Jinping, WEI Qingshun (1951)
Review and Monograph	
Review of the ecological compensation efficiency	ZHAO Xueyan (1960)
Scientific Note	
The effects of petroleum exploitation on water quality bio-assessment and benthic macro-invertebrate communities in the Yellow River Delta wetland, Dongying	CHEN Kai, XIAO Nengwen, WANG Beixin, et al (1970)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 6 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 6 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:100071	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@csbg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@csbg.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