

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第7期 Vol.33 No.7 **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 7 期

2013 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 线虫转型发育和寄主识别的化学通讯研究进展..... 张 宾,胡春祥,石 进,等 (2003)
- 生物物种资源监测原则与指标及抽样设计方法..... 徐海根,丁 晖,吴 军,等 (2013)

个体与基础生态

- 呼伦贝尔草原人为火空间分布格局..... 张正祥,张洪岩,李冬雪,等 (2023)
- 青藏高原草地地下生物量与环境因子的关系..... 杨秀静,黄 玫,王军邦,等 (2032)
- 1961—2010 年桂林气温和地温的变化特征 陈 超,周广胜 (2043)
- 黄泥河自然保护区狗冬季卧息地选择..... 朱洪强,葛志勇,刘 庚,等 (2054)
- 青藏高原草地植物叶解剖特征..... 李全发,王宝娟,安丽华,等 (2062)
- 青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应..... 徐满厚,薛 娴 (2071)
- 高温影响番茄小孢子发育的细胞学研究..... 彭 真,程 琳,何艳军,等 (2084)
- 黄土丘陵半干旱区柠条林株高生长过程新模型..... 赵 龙,王振凤,郭忠升,等 (2093)
- 柝属 7 种植物种子的发芽抑制物质研究..... 李庆梅,刘 艳,刘广全,等 (2104)
- 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响..... 陈冬青,皇甫超河,刘红梅,等 (2113)
- 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较..... 沈章军,欧祖兰,田胜尼,等 (2121)
- 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化..... 李 媛,程积民,魏 琳,等 (2131)
- 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响..... 周振江,牛晓丽,李 瑞,等 (2139)
- 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响..... 李 娟,廖洪凯,龙 健,等 (2147)
- 自生固氮菌活化土壤无机磷研究..... 张 亮,杨宇虹,李 倩,等 (2157)
- 德国鳶尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性 张呈祥,陈为峰 (2165)
- 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性..... 铁 梅,宋琳琳,惠秀娟,等 (2173)
- 基于叶面积指数改进的直角双曲线模型在玉米农田生态系统中的应用..... 孙敬松,周广胜 (2182)
- 中稻田三种飞虱的捕食性天敌优势种及农药对天敌的影响..... 林 源,周夏芝,毕守东,等 (2189)

种群、群落和生态系统

- 珠江口超微型浮游植物时空分布及其与环境因子的关系..... 张 霞,黄小平,施 震,等 (2200)
- 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系..... 陈永金,刘加珍,陈亚宁,等 (2212)
- 南海西北部陆架区鱼类的种类组成与群落格局..... 王雪辉,林昭进,杜飞雁,等 (2225)
- 滇西北高原碧塔湖滨沼泽植物群落分布与演替 韩大勇,杨永兴,杨 杨 (2236)
- 石羊河下游白刺灌丛演替过程中群落结构及数量特征..... 靳虎甲,马全林,何明珠,等 (2248)

资源与产业生态

- 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响..... 郑成岩,于振文,张永丽,等 (2260)

豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响..... 张达斌,姚鹏伟,李 婧,等 (2272)

沟壑全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响..... 李 荣,侯贤清,贾志宽,等 (2282)

城乡与社会生态

北京北护城河河岸带的温湿度调节效应 吴芳芳,张 娜,陈晓燕 (2292)

西安太阳总辐射时空变化特征及对城市发展的响应..... 张宏利,张纳伟锐,刘敏茹,等 (2304)

研究简报

安徽琅琊山大型真菌区系多样性..... 柴新义,许雪峰,汪美英,等 (2314)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2320)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-04



封面图说: 金灿灿的小麦熟了——小麦是世界上最早栽培的农作物之一,是一种在世界各地广泛种植的禾本科植物,起源于中东地区。全世界大概有 43 个国家,近 35%—40% 的人口以小麦为主要粮食。小麦是禾谷类作物中抗寒能力较强的越冬作物,具有一定的耐旱和耐盐碱能力。中国的小麦分布于全国各地,主要集中于东北平原、华北平原和长江中下游一带。小麦秋季播种、冬季生长、春季开花、夏季结实。子粒含有丰富的淀粉、较多的蛋白质、少量的脂肪,还有多种矿物质元素和维生素 B,是一种营养丰富、经济价值较高的粮食。

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/stxb201112201935

徐满厚, 薛 娴. 青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应. 生态学报, 2013, 33(7): 2071-2083.

Xu M H, Xue X. A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2071-2083.

青藏高原高寒草甸夏季植被特征及 对模拟增温的短期响应

徐满厚, 薛 娴*

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000)

摘要:以青藏高原高寒草甸为研究对象,研究了草甸植被夏季生长动态特征;同时采用红外辐射器模拟增温的方法,探讨了草甸植被对增温的短期(1a)响应。结果表明:(1)高寒草甸夏季植被高度与地下生物量、总生物量相关性不显著,盖度与二者相关性极显著;高度对地上生物量影响较大($R=0.892$, $P<0.01$),盖度对地下生物量($R=0.883$, $P<0.01$)和总生物量($R=0.888$, $P<0.01$)影响较大。(2)高寒草甸夏季植被地上部分和地下部分表现出不同的生长模式,地上部分近似等速生长(幂指数为 1.011),地下部分则表现为异速生长(幂指数为 0.459),但整体呈现异速生长(幂指数为 0.473)。(3)高寒草甸夏季植被地上生物量($P<0.05$)在 6 月份较地下生物量($P>0.05$)对环境更为敏感,且一年之后地上-地下生物量均呈减小趋势,这与空气温度、土壤温度和土壤水分的显著减小密切相关。(4)红外辐射器在高寒草甸的增温效果较好,空气、地表、土壤温度都随增温幅度增强而增加;短期增温对高寒植被有正效应(T0—T1),而温度持续升高则对植被产生负效应(T1—T2);各植被指标的方差分析都未达到显著水平,表明短期增温对该植被影响不显著。

关键词:青藏高原;高寒草甸;模拟增温;植被特征;生长模式

A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau

XU Manhou, XUE Xian*

Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: Climate warming has become a credible fact due to the increase of greenhouse gases. It is generally believed that the responses of ecosystem to elevated temperature are greatly sensitive and swift in high-latitude and high-elevation regions, especially in the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP), which has been considered as an ideal region to study the responses of terrestrial ecosystem to global climate changes. Some relevant researches have revealed that the QTP has a warming trend at the rate of $0.032\text{ }^{\circ}\text{C}$ per year. As one of the typical vegetation types in the QTP, alpine meadows are extremely fragile and significantly sensitive to climate warming. Once destroyed, it would be very difficult for them to recover in a short time, which would result in their degrading or desertification. Therefore, it is extremely important and urgent to become aware about the dynamic changes of alpine meadow vegetation due to climate warming in the QTP. In this study, infrared radiator heaters were used for experimental warming research job. And the results from this study are as follows:

(1) Vegetation characteristics of alpine meadow in summer. In summer, there was no significant correlation between vegetation height and belowground biomass ($P>0.05$). However, vegetation height was more correlated with aboveground

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2011CB403306);中国科学院“百人计划”项目

收稿日期:2011-12-20; 修订日期:2012-10-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xianxue@lzb.ac.cn

biomass ($R=0.892$, $P<0.01$), while vegetation coverage was more related to belowground biomass ($R=0.883$, $P<0.01$) and total biomass ($R=0.888$, $P<0.01$). The vegetative above-and belowground parts of alpine meadow showed different growth patterns, owing to the larger differences among their environments, especially the larger difference between ground and air temperature. The aboveground parts approximated the pattern of isometry with the power exponent of 1.011 and the belowground parts had a pattern of allometry with the power exponent of 0.459, but the whole presented an allometry pattern with the power exponent of 0.473. The vegetative above-and belowground biomass of alpine meadow tended to decrease after one year (2010-6—2011-10) and aboveground biomass ($P<0.05$) was more sensitive to surrounding environments than belowground biomass ($P>0.05$) in June, which were related to the significant decrease of soil temperature, soil water content and air temperature ($P<0.05$). Therefore, the responses of aboveground biomass to temperature and water content were stronger than belowground biomass after one year and the inter-annual variation of biomass was large.

(2) Responses of environment and vegetation of alpine meadow to warming after one year. The warming effects of infrared radiators were better in alpine meadow with the increase of air, surface, soil temperature of 0.07 °C (at 20 cm height), 1.66 °C, 1.23 °C (at 20 cm depth) respectively in T1 warming treatment (the warming degree is 1 °C), and 0.29 °C (at 20 cm height), 2.18 °C, 2.34 °C (at 20 cm depth) respectively in T2 warming treatment (the degree is 3 °C). Warming affected soil temperature at the 0—40 cm layer ($P<0.05$) much more than the 60—100 cm layer ($P>0.05$). The warming effects on soil temperature were weakened with soil depth, while the effects on soil water content were enhanced with soil depth. Warming pushed most soil water at the 0—40 cm layer down to deeper soil layers and was significantly different at the 100 cm depth. The warming effects on vegetation varied in different months. In a short time, warming enhanced vegetation height, coverage, above-and belowground biomass at early stage (T0—T1), and weakened them at later stage (T1—T2). Overall, warming had a positive effect on the vegetation of QTP, but it may turn negative with increasing temperature. However, the both warming effects were not significant, so the effects of warming on the vegetation of QTP alpine meadow were not significant over a short time.

Key Words: Qinghai-Tibetan Plateau; alpine meadow; experimental warming; vegetation characteristic; growth pattern

现今,由温室气体增加而引起的全球气候变化已经成为不容置疑的事实^[1]。根据政府间气候变化专门委员会第四次评估报告预测,到本世纪末全球平均气温将升高 1.8—4.0 °C^[2],而 Thomas 等^[3]认为在高纬度和高海拔地区温度升幅会更大。自 1965—1995 年,气温升高 1—2 °C 以上的地区主要集中在北纬 50°以上的陆地,该地区植被对温度变化异常敏感^[4]。Hall 等^[5]和 Keeling 等^[6]研究也发现,高纬度地区大气 CO₂ 的季节振幅在不断升高的同时全球陆地生态系统的净初级生产力也在增加。因此,科学家们普遍认为高纬度和高海拔生态系统对温度升高的响应更为敏感而迅速^[7]。

有“中华水塔”和“世界第三极”之称的青藏高原属于气候变化的敏感区和生态脆弱带^[8-9]。有研究表明^[10-11],随着全球变暖,青藏高原气候呈现出暖化趋势,而气候因素的变异将成为诱发生态变异的动力。作为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^[12],是典型的高原地带性和山地垂直地带性植被^[13],也是牧民的主要牧草来源。但其生态系统极其脆弱,对人类干扰和由温室气体引起的全球气候变化极其敏感,一旦遭受破坏很难在短期内得到恢复,并可能导致草地退化和沙漠化发生,从而影响牧民经济生活。在全球气候变暖的背景下,随着青藏高原气候暖化,高寒草甸植被的物候与生长、光合特征、生物量生产与分配,以及群落的演替和碳氮含量等都会随之发生改变。因此,研究青藏高原高寒草甸植被在全球气候变化下的动态变化规律及其驱动机制,对高纬度和高海拔地区植被的保护和有效利用,防止草地退化和沙漠化发生具有重要意义。为研究高寒植被在全球气候变化下的动态变化规律,在青藏高原高寒草甸区进行模拟增温实验,试图回答以下两个问题:(1) 高寒草甸夏季植被表现怎样的生长动态特征?(2) 高寒草甸环境与植被对短期增温如何响应?

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院冻土工程国家重点实验室青藏高原研究基地(简称北麓河试验站),地理坐标为 $34^{\circ}49'33.98''$ — $34^{\circ}49'36.58''$ N, $92^{\circ}55'57.19''$ — $92^{\circ}56'06.32''$ E, 平均海拔 4630 m。该地属青藏高原干寒气候区,年均气温为 -5.9°C ,年均降水量 267.6 mm,年均潜在蒸发量 1316.9 mm,年均风速 4.1 m/s,冻结期为 9 月至翌年 4 月^[14]。实验期间风速较小,4 m 高度处平均风速为 3.4 m/s。风向以西风为主,有时为西南偏西风。植被属高寒草甸类型,以高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)为建群种,伴生有矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、美丽风毛菊(*Saussurea pulchra*)、藏嵩草(*Kobresia tibetica*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、细小棘豆(*Oxytropis pusilla*)等,以莎草科和菊科的植物为主,蓼科的珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)也较为常见,植被盖度达 83%。动物主要是高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*),营群居生活,筑巢掘出土壤在地面堆积形成“小土丘”。土壤为高山草甸土,以沙土居多,剖面发育具有薄层性、粗骨性特点;表层具有 5—15 cm 厚草皮层,土层一般仅为 4—6 cm,有机质含量达 8—25 g/kg;表层以下常夹带多量砾石,呈 A_s - A_1 -C/D 结构,B 层发育不明显^[14]。

1.2 样地设置

实验样地设在距北麓河试验站约 300 m 的典型高寒草甸地段,植被分布均匀,地势较为平坦,未受放牧、鼠兔啃食等干扰。增温实验采用红外线辐射器,用于真实模拟全球气候变暖中增强的向下红外线辐射。不同能量辐射到地表可不同程度改变地面温度,据此实验布设 3 种能量梯度:0 W/m²(对照, T0)、130 W/m²(使地面温度约增加 1 $^{\circ}\text{C}$, T1) 和 150 W/m²(使地面温度约增加 3 $^{\circ}\text{C}$, T2),每种梯度 5 个重复,共计 15 个增温样地。每个增温样地面积 2 m $\times$ 2 m,分布位置如图 1 所示。增温样地正上方距地面 1.5 m 高度处架设红外线辐射器,其中 T0 处理只设灯架,用于消除各增温处理中灯架遮阴对植被的影响;距地面 1 m 高度处架设 SI-111 红外地表温度传感器,测定下垫面温度;距地面 20 cm 高度处架设 HMP45C 温湿度探头,测定 20 cm 高度空气温度、空气相对湿度和空气水汽压;土壤中布设 109SS-L 温度探头测定 20、40、60、100 cm 深度土壤温度,布设 FDR (Envior SMART) 水分探头测定 10、20、40、60、100 cm 深度土壤水分。采用 CR1000 数据采集仪进行数据采集,频度为 10 min 采集 1 次。为减弱强风对增温实验影响,根据研究区主风向(西风),在距增温样地中心位置 1.5 m 处设置两块高度为 1.5 m 的挡风板,分别位于增温样地的北面和西面。由于每个增温样地均设有挡风板,故各增温处理中挡风板遮阴对植被的影响也可消除(同灯架设置)。在增温样地外部空旷处架设一小型生态气象观测站,用于常规气象数据观测。增温样地(图 2a)和小型生态气象观测站(图 2b)均用铁丝网围栏,以防破坏。整个实验样地于 2010 年 6 月完成设置。

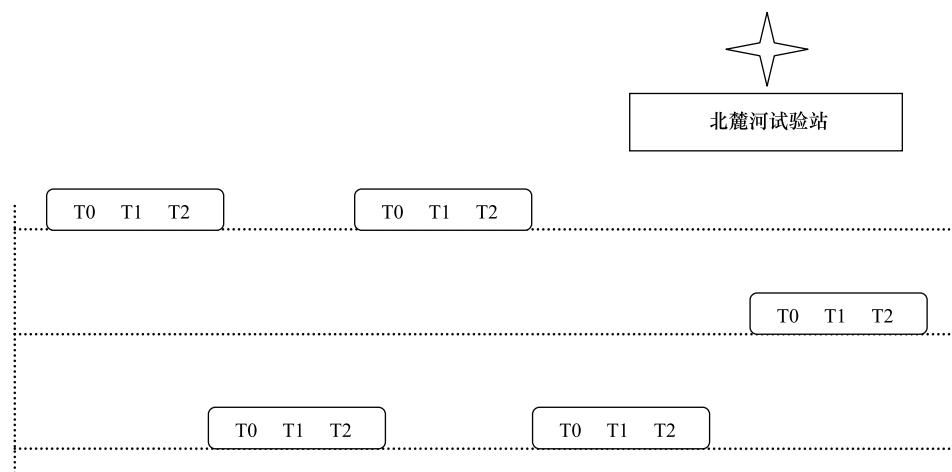


图 1 实验样地分布示意图

Fig. 1 Distribution schematic diagram of experimental plots

T0 为对照, T1 和 T2 分别为地面温度增加 1 $^{\circ}\text{C}$ 和 3 $^{\circ}\text{C}$ 的处理; T0 与 T1, T1 与 T2 间隔 5 m

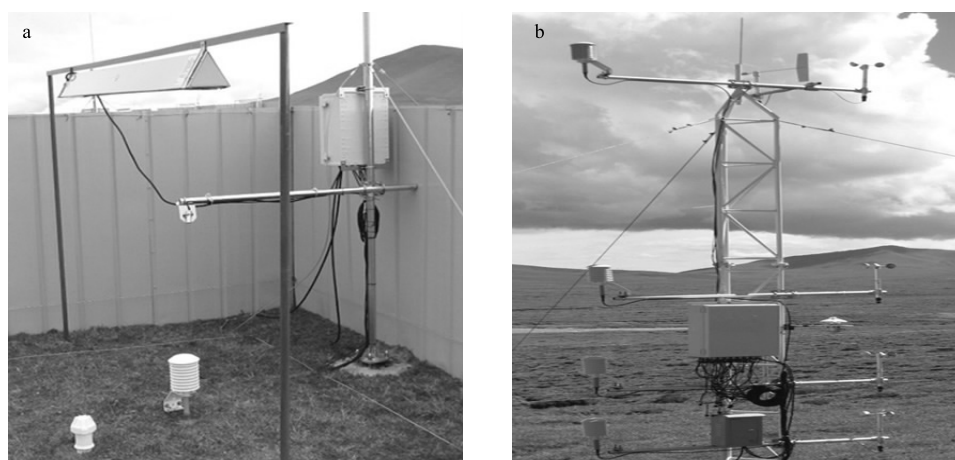


图2 增温样地与小型生态气象观测站

Fig. 2 Experimental warming plot and small ecological meteorology station

1.3 调查方法

增温样地用做长期观测,为避免对该样地产生较大人为干扰,在其外围 2 m 左右处选取高度和盖度与之较为一致的植被作为非实验样地。根据非实验样地植被覆盖情况设置大小为 20 cm×20 cm 或 30 cm×30 cm 的样方,测其植被高度、盖度和地上-地下生物量,测定时间为 2010 年 6、8 月和 2011 年 6、7、8、10 月,每月调查 10 个样方,共计 60 个。为保证测定时间的一致性,于 2011 年夏季(6、7、8 月,已增温 1a)测定增温样地植被高度和盖度。由于非实验样地是在增温样地周围近距离处选取,二者生境相同,且植被高度和盖度与增温样地植被较为一致,故可通过建立非实验样地植被地上-地下生物量与高度、盖度的多元回归方程(见数据分析)间接推导出增温样地不同时期的植被地上-地下生物量。

各样地植被指标按以下方法进行测定:植被高度用特制的直尺测定,由于高寒草甸植物矮小,为减小测量误差,将直尺零刻度线至边缘的空白区去掉,使直尺从零刻度开始,按对角线测定高度值,增温样地每条对角线上随机测定 20 个,共测 40 个高度值;非实验样地由于样方小,每条对角线上随机测定 5 个,共测 10 个高度值。盖度借助大小为 27 cm×27 cm 的样方框测定,并根据样方框大小特制一个网格尺寸为 2.5 cm×2.5 cm 的硬铁丝网,网格数为 100 个,在测定植被盖度时将其平铺在样方框内,计数被植被覆盖的小方格;增温样地由于面积大,测定时先将样地平分为 4 个部分,然后测定每一部分的盖度值,取其平均值作为该样地的盖度,非实验样地直接测定样方中的盖度值。地上生物量采用齐地刈割法,在刈割时会有部分植物残片掉落,因此刈割完毕用毛刷将未收集的地上部分扫在一起,去除附着的土块后重新收集到样品袋中;高寒草甸中有些植物铺地生长,如垫状点滴梅(*Androsace tapete*),对于这类植物普通剪刀难以将其割掉收集,因此对地上部分的刈割采用的是弯剪。地下生物量采用挖土块法,在地上部分刈割完毕,将样方内 0—30 cm 深度的土壤全部挖出(土量为 20 cm×20 cm×30 cm 或 30 cm×30 cm×30 cm),为防止根系腐烂在北麓河试验站立即放进网孔为 1 mm×1 mm 的筛网中冲洗、晒干,连同地上部分一起带回实验室放进 75 °C 的烘箱中烘干 48 h 至恒重,然后称重。为保证大部分根系具有活性,根系采集于夏季进行,而且在实验中发现,根系具有极其相似的灰褐色,为区分根系中的活根和死根,将根斜割断后根据断面的颜色和根的柔韧性进行判断。

1.4 数据分析

通过测定和计算获得用于分析的数据有:非实验样地的 60 组植被数据(高度、盖度、地上生物量、地下生物量、总生物量、根冠比),其中有 30 组为夏季植被数据;非实验样地的环境因子数据(0.5、1、2、4 m 高度的空气温度、空气相对湿度和风速,10—100 cm 深度的土壤温度和土壤水分);增温样地的夏季植被数据(高度、盖度)和环境因子数据(20 cm 高度的空气温度、空气相对湿度和空气水汽压,红外地表温度,10—100 cm 深度的土壤水分,20—100 cm 深度的土壤温度)。首先利用非实验样地的这 60 组植被数据通过 SPSS17.0 软

件构建植被地上生物量和地下生物量与高度、盖度的多元回归方程: $AB = 72.739C + 30.257H - 29.95$ ($R^2 = 0.322$, $P < 0.01$), $BB = 14187.995C - 340.281H - 2249.69$ ($R^2 = 0.604$, $P < 0.01$), 其中 H 为高度/cm、 C 为盖度、 AB 为地上生物量、 BB 为地下生物量。然后用 SPSS17.0 软件和 Origin8.1 软件对非实验样地和增温样地夏季植被指标进行相关、回归分析,用 Origin8.1 软件对非实验样地植被随时间的变化情况进行趋势分析,以此得到青藏高原高寒草甸夏季植被特征。最后用 Origin8.1 软件对增温样地环境因子和植被随增温的变化情况进行趋势分析,得到青藏高原高寒草甸环境与植被对增温的短期响应。指标间的显著性检验由 SPSS17.0 软件进行方差分析得到,多重比较由 Duncan 检验完成;分析图的绘制由 Origin8.1 软件完成。

2 结果与分析

2.1 青藏高原高寒草甸夏季植被特征

2.1.1 夏季植被指标间的相互关系

空间上研究整个样地(增温样地和非实验样地)夏季植被指标间的相互关系,对其进行相关分析(表1)。结果显示:高度与地上生物量呈极显著正相关,与根冠比呈极显著负相关,但与地下生物量和总生物量的相关性未达到显著水平;盖度与地上生物量、地下生物量和总生物量都呈极显著正相关,与根冠比呈显著正相关。高度与地上生物量的相关系数(0.892)大于地下生物量(0.214)和总生物量(0.239),说明高度对地上生物量影响较大;盖度与地下生物量(0.883)和总生物量(0.888)的相关系数接近,且都大于地上生物量(0.579),说明盖度对地下生物量和总生物量影响较大。地上生物量与地下生物量的正相关性达到极显著水平,说明植被地上-地下生物量密切相关,即植被在将能量分配给地上茎叶的同时也分配到地下根系。

表1 植被指标间的相关分析

Table 1 Correlation analysis among vegetation indexes in all plots

	盖度 Coverage	地上生物量 Aboveground biomass	地下生物量 Belowground biomass	总生物量 Total biomass	根冠比 Root:shoot ratio
高度 Height	0.461 **	0.892 **	0.214	0.239	-0.598 **
盖度 Coverage		0.579 **	0.883 **	0.888 **	0.326 *
地上生物量 Aboveground biomass			0.461 **		

* : $P < 0.05$, ** : $P < 0.01$

为进一步探讨植被地上部分和地下部分的相互关系,对各植被指标进行回归分析,得图3。高度与地下生物量、总生物量不呈显著线性关系(表1),而呈极显著幂函数关系(图3)。除图3i外,其他回归关系图都呈现出极显著幂函数关系,幂指数变化范围在0.36—1.7之间,表明高寒草甸植被符合异速生长理论。当幂指数接近于1时,则表现为等速生长。如图3c所示,幂指数为1.0111,表明地上生物量随高度近似等速变化,即高度每增加1 cm,地上生物量就近似增加36.7 g/m²,图3d的幂指数(1.1523)也较接近于1,说明高寒草甸植被地上部分近似等速生长。图3e和图3f的幂指数分别为0.4585和1.7002,表明地下部分却为异速生长。因此,高寒草甸植被地上部分和地下部分由于所处环境不同而表现出不同的生长模式,但就总体而言(图3g和图3h),高寒草甸植被表现为异速生长。10幅回归图中只有图3i表现为负相关,其他为正相关,该结果与表1一致;高度与地上生物量的决定系数(0.8461)大于地下生物量(0.1407)和总生物量(0.1537),盖度与地下生物量(0.9041)和总生物量(0.9111)的决定系数大于地上生物量(0.5133),这也证明了高度对地上生物量影响较大,盖度对地下生物量和总生物量影响较大。

2.1.2 非实验样地植被随时间的变化趋势

从时间上看,非实验样地的数据采集时间跨度1a(2010-6—2011-10),以6月份和8月份的植被数据为例,探讨高寒植被随时间的变化趋势(图4),以6月份的数据来看,1a之后植被生物量都有减小趋势,其中地上生物量显著减小,地下生物量减小不显著,根冠比显著增加;以8月份的数据来看,植被地上-地下生物量也呈减小趋势,但都未达到显著水平,而根冠比呈增加趋势,说明植被地上生物量的减小幅度大于地下生物量。因此,高寒草甸植被根系更新较慢,使地下生物量在1a之后变化不显著。另外,地上生物量($P < 0.05$)在

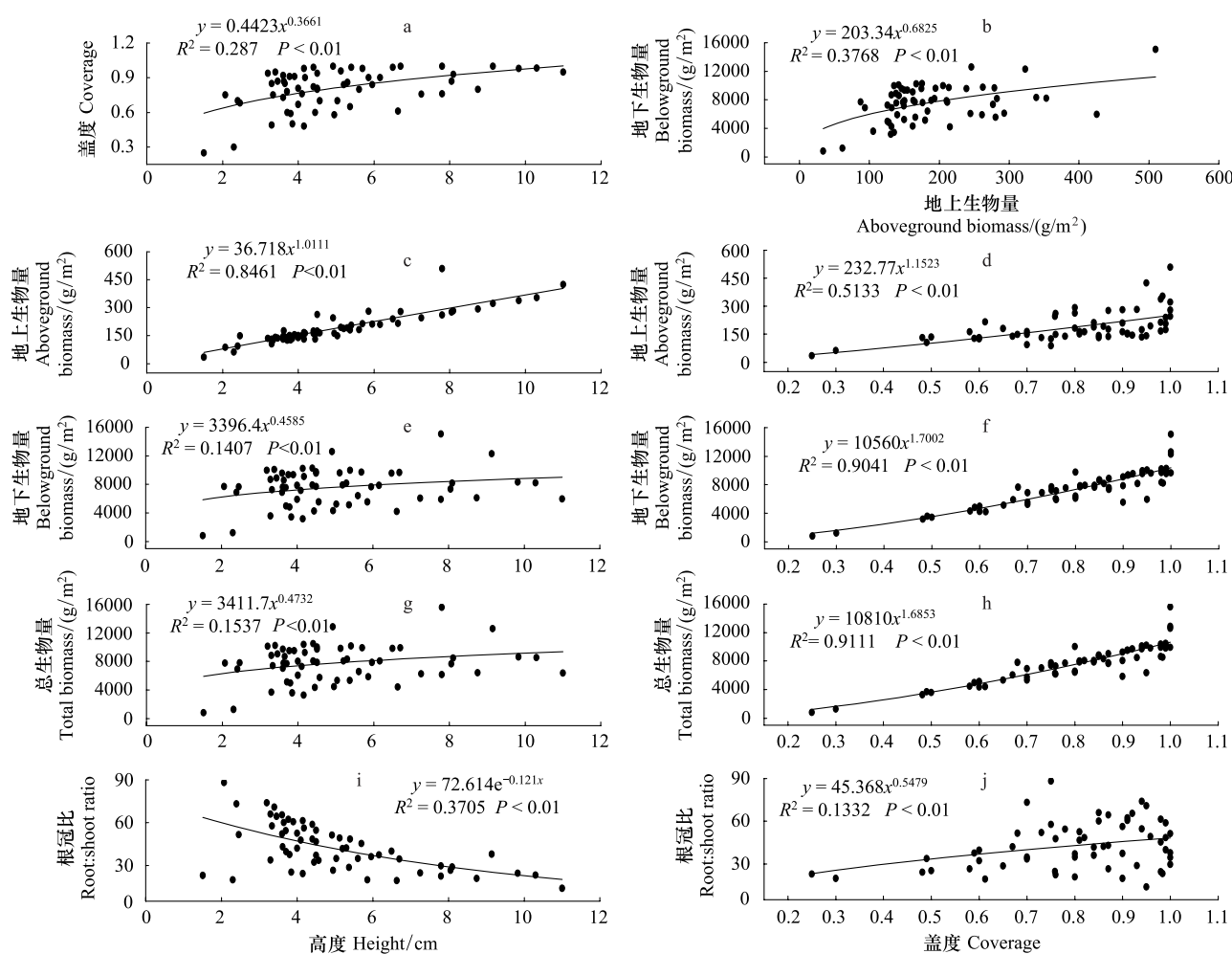


图3 植被指标间的回归分析

Fig. 3 Regression analysis between vegetation indexes in all plots

6 月份对环境较地下生物量 ($P > 0.05$) 敏感,但在 8 月份敏感性减弱,使生物量年际变化较大。

为分析植被生物量减小的原因,对非实验样地 1a 之后 6 月份和 8 月份的环境因子进行统计分析。图 5 显示,1a 之后不同深度的土壤温度在 6 月份和 8 月份均极显著减小;土壤水分在 6 月份除 10 cm 深度未达到显著水平外,其他各深度均显著减小,在 8 月份则只有 10 cm 深度达到显著水平,但总体也呈现减小趋势。1a 之后不同高度的空气温度在 6 月份和 8 月份均显著减小;空气相对湿度和风速未达到显著水平,且二者的变化趋势也不明显。空气相对湿度在 6 月份和 8 月份略有减小;风速在 6 月份略有增大,在 8 月份略有减小。可见,实验期间空气相对湿度和风速对植被影响较小。通过对图 4 和图 5 的分析可知,1a 之后植被生物量的减小与土壤温度、土壤水分及空气温度的显著减小密切相关,并且地上生物量较地下生物量对温度和水分的变化响应更为敏感。

2.2 青藏高原高寒草甸环境与植被对增温的短期响应

2.2.1 增温样地环境因子随温度升高的变化趋势

(1) 温度的变化

图 6 所示,温度随土层加深和高度增加而减小,随增温幅度增强 (T_0 — T_2) 而增加,并且在土壤 40 cm 深度以后的 T_0 和 T_1 之间差异不再显著。空气、地表、土壤温度都随增温幅度增强而增加,表明红外辐射器起到了提高温度的作用,即红外辐射器在高寒草甸的增温效果较好。另外,红外辐射器对 0—40 cm 深度的土壤温度影响较大 ($P < 0.05$),对 60—100 cm 深度的土壤温度影响较小 ($P > 0.05$)。随土层加深和高度增加,增

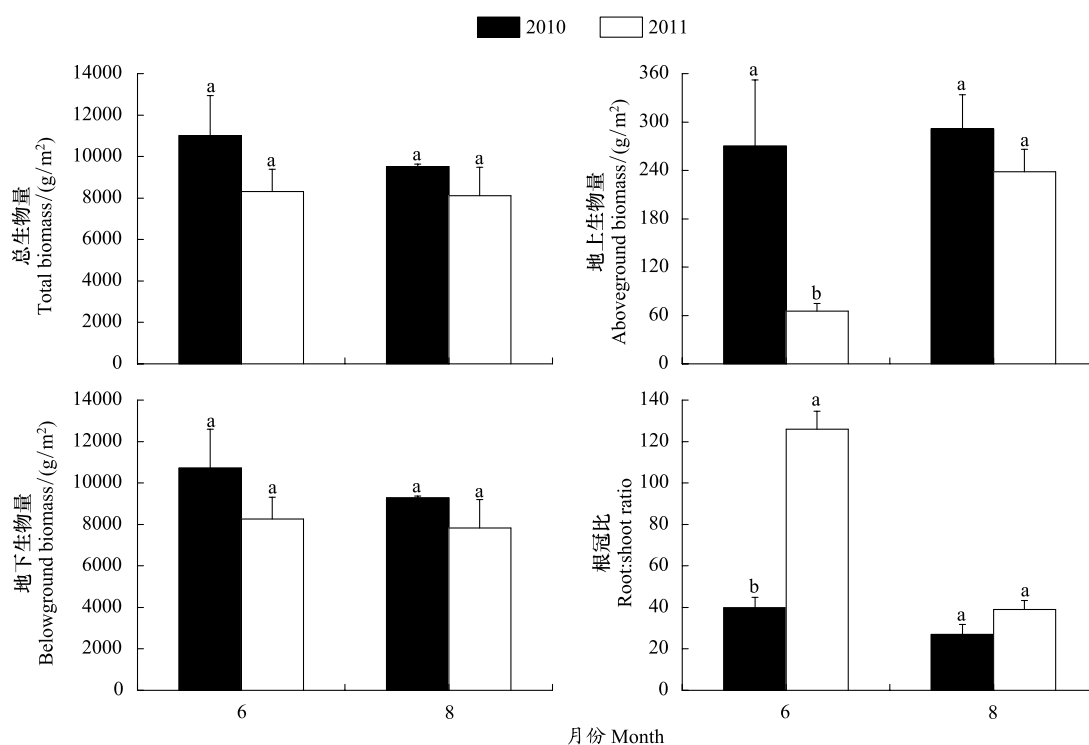


图4 非实验样地植被指标 1a 后的变化

Fig. 4 Variation of vegetation indexes in non-experiment plots after one year

相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

温处理间距缩小,表明增温对温度影响减弱。

(2) 水分的变化

图7所示,随土壤深度增加,土壤水分在0—20 cm内减少,20—100 cm内增加,表明高寒草甸区土壤水分主要分布在深层。由于高寒草甸植被根系浅,主要利用表层土壤水分,致使0—20 cm内土壤水分降低。增温处理间距在0—40 cm内减小,40—100 cm内增加,表明增温促进0—40 cm内土壤水分减少,40—100 cm内土壤水分增加,即增温对土壤水分的影响随土层加深而增加,与土壤温度的变化趋势相反。20 cm高度空气湿度随增温而降低,并在T₀和T₂之间差异达到显著水平;20 cm高度空气水汽压随增温有先减小后增加的趋势,但整体变化不大,且增温处理间的差异也不显著,这说明增温1a后0—40 cm内的土壤水分较少蒸发到空气中,而是大部分下移到土壤深层,并在100 cm深度处的T₀和T₂之间出现显著差异。不同土层土壤水分在不同增温处理下的变化趋势也表明,红外辐射器在高寒草甸起到了较好的增温效果。

2.2.2 增温样地植被随温度升高的变化趋势

在非实验样地,从空间和时间两个角度探讨了植被指标间的相互关系,以此得到高寒草甸夏季植被的生长动态特征。在模拟增温处理下,该植被会发生怎样的变化,如图8所示。各类植被指标在不同增温处理下的变化趋势可分为三类:高度和地上生物量为一类,其变化趋势在6月和8月先增加后减小,增温1℃和增温3℃大于增温0℃,增温3℃略小于增温1℃;在7月则逐渐增加。第二类为盖度、总生物量和地下生物量,其变化趋势在6月和7月先增加后减小,增温1℃大于增温0℃和增温3℃;在8月增温0℃和增温3℃相差不大。第三类为根冠比,其变化趋势在6月和7月逐渐减小;在8月先减小后增加,增温0℃和增温3℃相差不大。可见,增温对植被的影响在不同月份较不一致,但总体来说,增温对植被有正效应,其中植被高度和地上生物量随增温有增加趋势,盖度、地下生物量和总生物量在前期有增加趋势,后期增加趋势减弱(表2)。就植被在T₁—T₂的变化趋势而言,各植被指标均有减小趋势,而且各指标在T₂与T₁之间的平均差值均为负值(表2),这表明温度持续升高对植被产生负效应。各植被指标的方差分析都未达到显著水平,说明短期

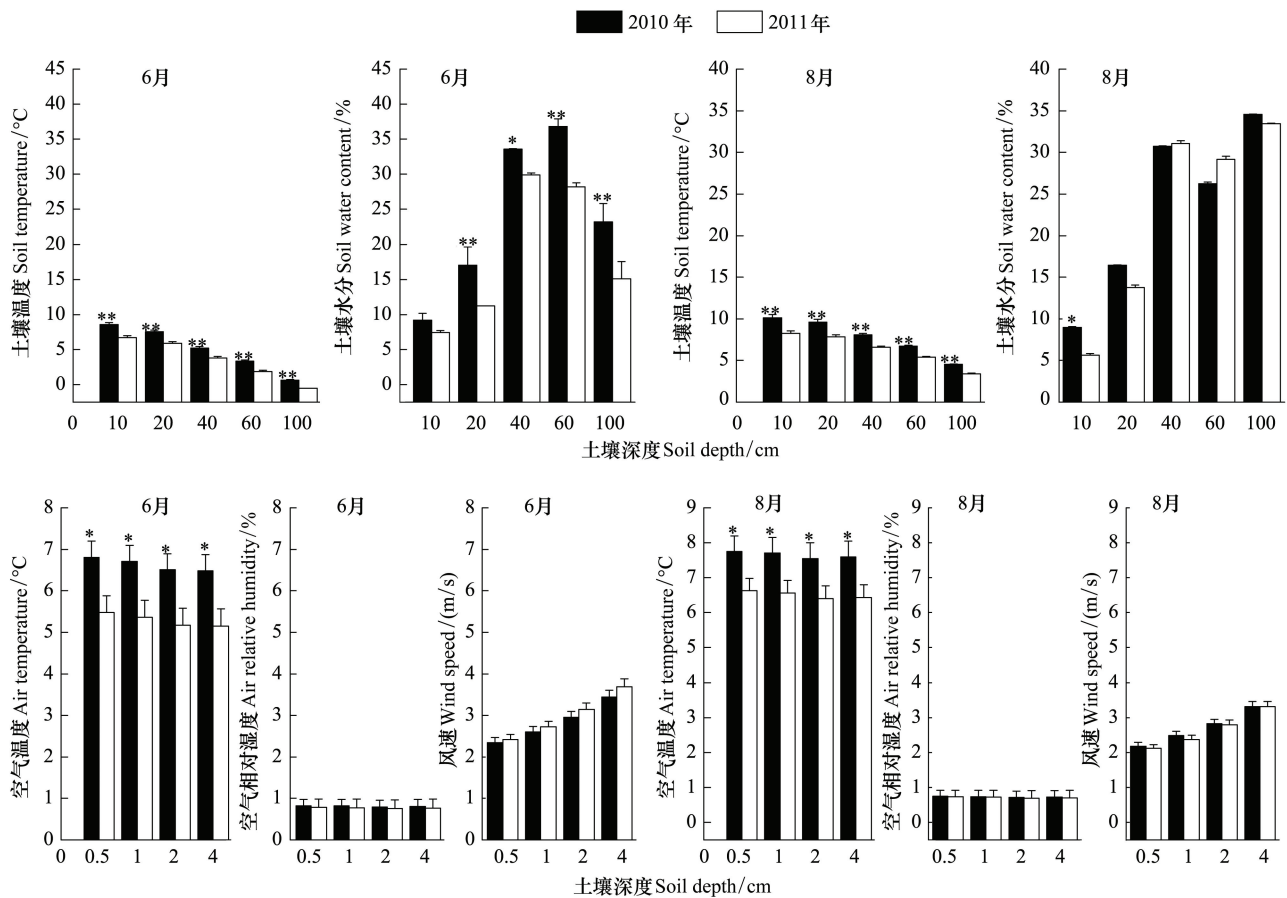


图5 非实验样地环境因子1a后的变化

Fig. 5 Variation of environment factors in non-experiment plots after one year

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

增温对该植被影响并不显著。

3 讨论

3.1 高寒植被生物量对增温的响应

温度控制着生态系统中许多生物化学反应速率,且几乎影响所有生物学过程^[15-16]。温度升高在一定程度上满足了植物对热量的需求,但也改变了植物群落的小气候环境,从而通过多种途径直接或间接影响植物的生长发育及生物量生产^[11,17]。在本研究中,增温对高寒植被的影响在不同月份较不一致,总体来说,植被高度、盖度和地上-地下生物量随增温有增加趋势(T0—T1),但温度持续升高会对植被产生负面影响(T1—T2);各植被指标的方差分析都未达到显著水平,得到短期增温对该植被影响并不显著的结论。在生物量生产对增温响应的研究上,不同学者得到的结论不尽相同:

(1)增温可通过降低土壤含水量或增加植物呼吸作用减少植物生物量生产。Melillo等^[18]认为,增温后土壤含水量减少或植物呼吸作用增强,都能导致植物净初级生产力下降。Boeck等^[19]的研究结果也显示,由于增温导致土壤含水量减少,地上和地下生量都明显下降,其中地上生物量下降了18%,地下根系生物量下降

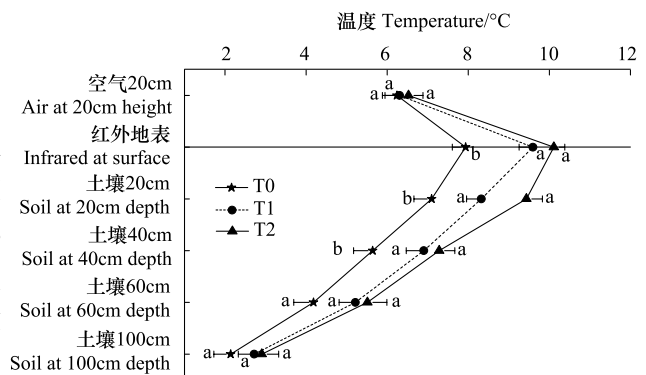


图6 增温样地不同处理下温度的变化趋势

Fig. 6 Changing trend of temperature in different treatments of experimental warming plots

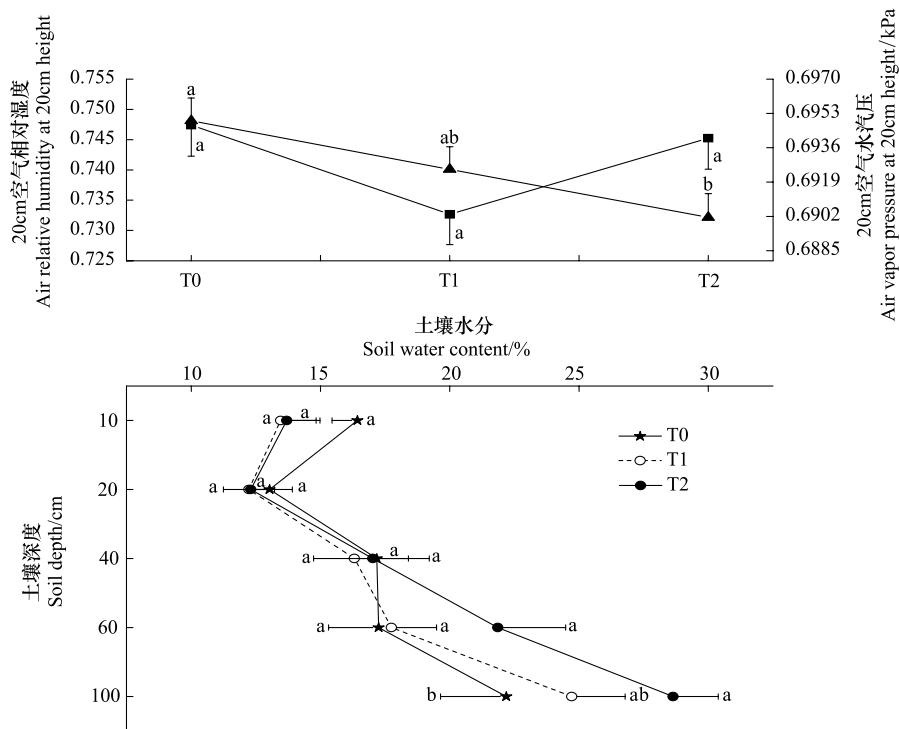


图7 增温样地不同处理下水分的变化趋势

Fig. 7 Changing trend of water content in different treatments of experimental warming plots

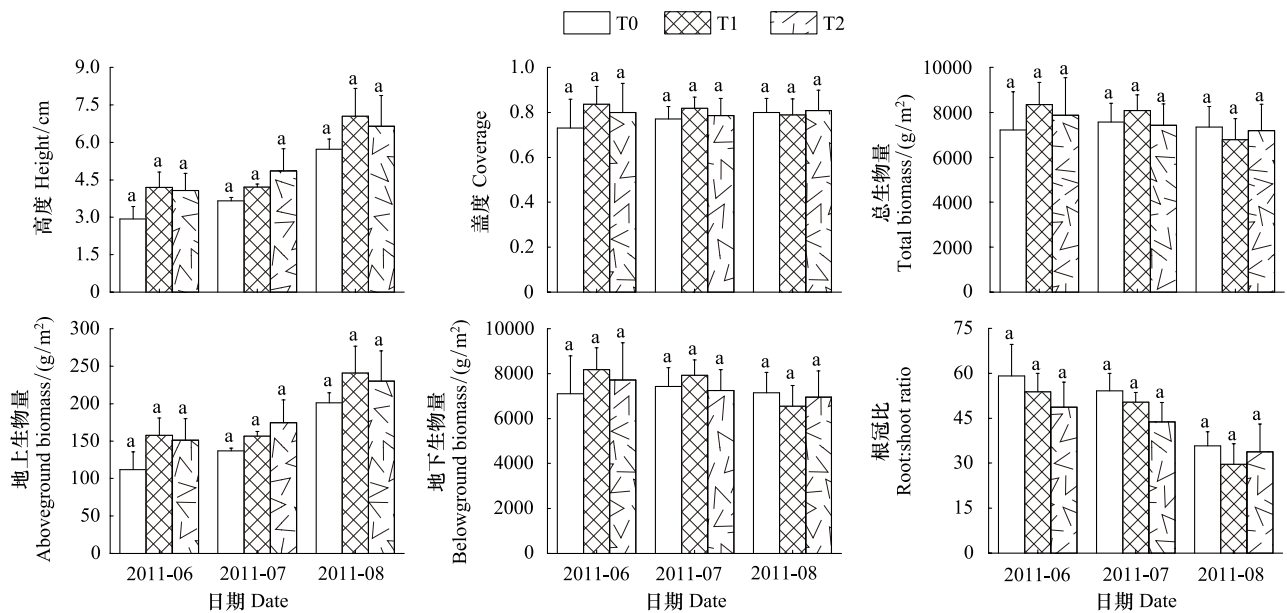


图8 各月份不同处理下植被指标的变化趋势

Fig. 8 Changing trend of vegetation indexes in different treatments of different months

了23%。

(2)增温可通过提高新陈代谢增加植物的光合能力或通过较高的分解作用增强植物对矿物营养的吸收,从而增加植物生物量生产。研究表明,温度升高能提高极地和高山地区植物的营养生长,促进该区植物的生理活动和表现,使生物量增加^[20-21]。对于大多数温带和北方树种而言,在水分和养分充足的条件下,增温也会促进植物生物量积累^[22]。然而,羊留冬等^[23]的研究却表明,增温在一定程度上降低了峨眉冷杉幼苗对

表 2 各植被指标在不同增温处理间的差值百分比 (平均值 $\pm$ 标准误) * / %Table 2 Difference percentage of vegetation indexes between different warming treatments (Mean $\pm$ SE)

指标 Indexes	增温处理间的差值百分比 Difference percentage between warming treatments / %		
	T1—T0	T2—T0	T2—T1
高度 Height	26.15 $\pm$ 0.08	26.01 $\pm$ 0.07	-0.14 $\pm$ 0.04
盖度 Coverage	6.49 $\pm$ 0.05	4.26 $\pm$ 0.03	-2.23 $\pm$ 0.02
总生物量 Total biomass	4.92 $\pm$ 0.07	2.63 $\pm$ 0.04	-2.29 $\pm$ 0.03
地上生物量 Aboveground biomass	24.27 $\pm$ 0.08	24.15 $\pm$ 0.06	-0.12 $\pm$ 0.04
地下生物量 Belowground biomass	4.49 $\pm$ 0.06	2.16 $\pm$ 0.04	-2.33 $\pm$ 0.02

* 差值百分比为 6、7、8 月的平均值

养分的利用效率,使幼苗的生物量降低了 18.97%,认为增温对幼苗生长和生物量积累具有明显的限制作用,对叶片生长的阻碍作用尤为突出。

(3) 由于增温持续时间不同,增温对植物生物量的影响差异较大。Zhang 等^[24]和周华坤等^[13]通过 1a 的增温试验认为,在短期增温条件下群落的总生物量变化不明显。而李英年等^[12]通过 5a 的增温试验研究表明,在模拟增温初期生物量增加,但增温 5a 后生物量反而下降。杨兵等^[25]通过 65 个月的增温试验研究显示,增温对岷江冷杉幼苗的茎、侧枝、叶和总生物量具有显著的促进作用,但对根生物量没有显著影响,认为长期增温能显著促进岷江冷杉幼苗的生长和物质积累,改变生物量分配格局,促使叶片物质向茎转移,降低光合物质投入。

(4) 不同的增温幅度对植物生物量的影响也不一样。李娜等^[26]研究表明,小幅度增温使高寒草甸 OTC1 内 0—5 cm 根系层的生物量增加,地上和地下 5—20 cm 根系层生物量分配比例减少,但变化均不显著;大幅度增温处理后,由于受到水分条件的限制更明显,OTC2 内地上生物量分配比例减小,地下生物量开始向着深层土壤的根系层转移,但统计检验也不显著。在本研究中发现,增温后 0—40 cm 内的土壤水分较少蒸发到空气中,而是大部分下移到土壤深层,且 T2 处理下的下移幅度大于 T1,这样就可能使植物根系生物量向深层转移。同时本研究也得到,温度持续升高对植被产生负效应 (T1—T2),但也未达到显著水平。因此,增温对植物生物量生产的影响较为复杂,有正效应,也有负效应,并受增温持续时间和增温幅度限制。

3.2 高寒植被的生长模式

异速生长规律描述生物的个体大小和其它属性之间的非线性数量关系,通常以幂函数形式表示,它可以表示生物体的两个不同器官大小或不同属性之间的相关关系^[27]。West 等^[28-30]提出的分形分配网络模型从养分和水分高效输导的角度解释了生物的各种异速生长关系。随后,Enquist 等^[31]又发展了异速生长理论,提出等速生长理论。本研究得到高寒草甸植被地上部分和地下部分表现出不同的生长模式,地上部分近似等速生长 (幂指数为 1.0111),地下部分却表现为异速生长 (幂指数为 0.4585),但整体上呈现异速生长 (幂指数为 0.4732)。Mokahy 等^[32]从全球尺度上研究了草地地下-地上生物量的关系,发现二者存在弱的幂指数关系 ($R^2=0.12$, $P=0.05$)。Yang 等^[33-34]从群落水平上研究了中国草地地下-地上生物量的分配关系,结果表明二者符合极显著的幂指数函数关系 ($R^2=0.56$, $P<0.001$),且经对数转换后线性关系的斜率范围为 0.93—1.1,平均 1.01,其中高寒草甸的斜率为 0.94,说明在群落水平上中国草地/青藏高原高寒草甸地上-地下生物量分配符合等速生长理论。王亮等^[35]从植物个体水平上研究了中国草地地下-地上生物量分配关系,得到的结论并不支持等速生长假说,且青藏高原高寒草甸植物个体地上生物量与地下生物量相关生长关系的斜率 (0.71) 显著低于内蒙温带草地植物 (0.84)。在本研究中,青藏高原高寒草甸植被地上生物量与地下生物量也存在极显著的幂指数函数关系 ($R^2=0.38$, $P<0.001$),但经对数转换后线性关系的斜率为 0.68,符合异速生长理论。本研究和王亮等^[35]的研究并不支持等速生长理论,可能与研究区植被的生长特点有关。青藏高原高寒草甸植物的分形结构并不像木本植物那样清楚,许多多年生草本物种为莲座状叶基生植物,其茎主要是繁殖器官的支持结构,而非起到向叶运输营养的通道作用;地下部分也不都是吸收营养和水分的器官,它们常常异化出具有储

藏或者其他功能的结构,如块茎、块根、地下茎等^[35]。所以,很多高寒草地植物不能完全满足 Enquist 等^[31]人的理论假设,特别是关于植物茎长度与根长度大致按比例增长的假设。本研究还得到高寒草甸植被地上部分和地下部分表现出不同的生长模式,这可能与地上部分和地下部分所处环境差异较大有关,如地气温差。在本研究中,3 种增温处理下 20 cm 深度土壤温度和 20 cm 高度空气温度的差值分别为 1.16 °C、2.17 °C、2.9 °C (数值为 6、7、8 月的平均值),且随增温幅度呈递增趋势,其中 T0 处理为对照组,可以反映自然状态。因此,青藏高原高寒草甸夏季的地气温差约为 1.16 °C,但在气候变暖的背景下,该地气温差有增大趋势。张文纲等^[36]认为,青藏高原冬季地气温差很小,夏季地气温差最大。王澄海等^[37]的研究也表明,青藏高原地区月地气温差从 1 月开始增大,到 6 月达到最大值,平均为 1.3 °C。本研究得到的高原夏季地气温差略小于王澄海等^[37]人的结论,是因为地气温差在 7 月之后逐渐减小,到 12 月达到全年的最小值。

3.3 根系采样的误差分析

在本研究中,根系采集时间选择夏季进行,此时植被根系大多具有活性,然后从根系的颜色和柔韧性两方面对活根和死根进行了鉴别,但结果显示地下生物量比 Yang 等^[33-34]和王亮等^[35]的研究大,这可能与采样尺度、植被类型及环境因素等有关。王亮等^[35]研究的个体数据采样点和群落水平采样点都是内蒙古温带草地及青藏高原高寒草甸的典型植被样地,地理位置和采样时间并不完全一致,可能会存在小环境的差别。而本研究只选择高寒草甸,且样地布置位于同一生境,小环境的影响可以忽略。Yang 等^[33-34]的研究能够很好的反映中国草地地下-地上生物量比 (R/S),但由于采样尺度、放牧干扰及植物物候的影响,使 R/S 的估测仍具有不确定性。本实验样地设在植被分布均匀、地势较为平坦且未受放牧、鼠兔啃食等干扰的地区,并用铁丝网将实验样地围栏,于植被生长季进行根系采集,但得到的根系生物量仍具有较大差异。因此,根系采集的误差不仅受环境因子、生态类型的影响,还受采样尺度、采样方法及采样时间的限制。王亮等^[35]认为虽然通过颜色等方法区分了活根和死根,但由于草地群落中植物的种类众多,根的颜色、形态多样,使区分活根和死根的难度很大,而地下部分可能被高估。因此,今后需要探索出更准确、更便捷的方法对根系活性进行鉴定。

4 结论

4.1 青藏高原高寒草甸夏季植被特征

夏季植被高度与地下生物量、总生物量关系不显著,但对地上生物量影响较大,盖度对地下生物量和总生物量影响都较大。在植被生长过程中,地上部分与地下部分密切相关,植被在将能量分配给地上茎叶的同时也分配到地下根系。然而,由于地上部分和地下部分所处环境差异较大(如地气温差)而表现出不同的生长模式,地上部分近似等速生长,地下部分则表现为异速生长,但植被整体呈现异速生长。高寒草甸植被根系更新较慢,使地下生物量在 1a 之后变化不显著;地上生物量在 6 月份对环境较地下生物量敏感,但在 8 月份敏感性减弱,使生物量年际变化较大。1a 之后植被地上生物量和地下生物量均呈减小趋势,这与土壤温度、土壤水分及空气温度的显著减小密切相关,并且地上生物量较地下生物量对温度和水分更为敏感。

4.2 青藏高原高寒草甸环境与植被对增温的短期响应

红外辐射器在高寒草甸的增温度效果较好。空气-地表-土壤温度都随增温幅度增强而增加,并对 0—40 cm 深度土壤温度产生较大影响。增温对温度的影响随土层加深和高度增加而减弱,对土壤水分的影响随土层加深而增强。增温促使 0—40 cm 深度土壤水分大部分下移至深层,并在 100 cm 深度处出现显著差异,因此增温促进 0—40 cm 深度土壤水分减少,增加 40—100 cm 深度土壤水分。增温对植被的影响在不同月份较不一致,但总体来说,增温对植被产生正效应,其中植被高度和地上生物量随增温有增加趋势,盖度和地下生物量在前期有增加趋势,后期增加趋势减弱。就植被在 T1—T2 的变化趋势而言,温度持续升高会对植被产生负效应。各植被指标的方差分析都未达到显著水平,表明短期增温对该植被影响并不显著。

最后应说明的是本研究中实验样地仅获得 1a 的数据,很难作出长期预测,但仍可以看出增温在短期内对青藏高原高寒草甸土壤温度、土壤水分以及植被的高度、盖度、地上生物量、地下生物量均产生了一定影响。

致谢:感谢 Becky Sherry、周旭辉、李锋瑞教授和邵锋副教授对本文写作的帮助;感谢顾梦鹤、彭飞、尤全刚、陈

勇在实验过程和数据处理中给予的帮助。

References:

- [1] Oreskes N. The scientific consensus on climate change. *Science*, 2004, 306(5702): 1686-1686.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The Physical Science Basis. The Fourth Assessment Report of Working Group, 2007. <http://www.ipcc.ch/>. Cited 14 May 2007.
- [3] Thomas C D, Cameron A, Green R E, Bakkenes M, Beaumont L J, Collingham Y C, Erasmus B F N, Siqueira M F, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, Jaarsveld A S, Midgley G F, Miles L, Ortega-Huerta M A, Peterson A T, Phillips O L, Williams S E. Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, 427(6970): 145-148.
- [4] Goulden M L, Wofsy S C, Harden J W, Trumbore S E, Crill P M, Gower S T, Fries T, Daube B C, Fan S M, Sutton D J, Bazzaz A, Munger J W. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw. *Science*, 1998, 279(5348): 214-217.
- [5] Hall C A S, Ekdahl C A, Wartenburg D E. A fifteen-year record of the biotic metabolism in the Northern Hemisphere. *Nature*, 1975, 255(5504): 136-138.
- [6] Keeling C D, China J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 1996, 382(6587): 146-149.
- [7] Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. Climate effects on mountain plants. *Nature*, 1994, 369(6480): 448-450.
- [8] Yang Y H, Piao S L. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 1-8.
- [9] Yin H J, Lai T, Cheng X Y, Jiang X M, Liu Q. Warming effects on growth and physiology of seedling of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* under two contrasting light conditions in subalpine coniferous forest of Western Sichuan, China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(5): 1072-1083.
- [10] Wang M, Li Y, Bai X Z, Huang R Q. The impact of global warming on vegetation resources in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(3): 331-336.
- [11] Shi F S, Wu N, Luo P. Effect of temperature enhancement on community structure and biomass of subalpine meadow in Northwestern Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5286-5293.
- [12] Li Y N, Zhao L, Zhao Q X, 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.
- [13] 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, 24(5): 547-553.
- [14] Zhao X Q. Alpine meadow ecosystem and global climate change. Beijing: Science Press, 2009: 1-32.
- [15] Xu Z F, Hu T X, Zhang Y B, Xian J R, Wang K Y. Freezing damage in early spring induced by simulated global warming: a case study in *Abies faxoniana*. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6275-6280.
- [16] Xu Z F, Hu T X, Zhang L, Zhang Y B, Xian J R, Wang K Y. Short-term gas exchange responses of *Betula utilis* to simulated global warming in a timber-line ecotone, eastern Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(3): 263-270.
- [17] Zhang L R, Niu H S, Wang S P, Li Y N, Zhao X Q. Effects of temperature increase and grazing on stomatal density and length of four alpine *Kobresia* meadow species, Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6961-6969.
- [18] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, Moore B, Vorosmarty C J, Schloss A L. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.
- [19] De Boeck H J, Lemmens C M H M, Gielen B, Bossuyt H, Malchair S, Carnol M, Merckx R, Ceulemans R, Nijs I. Combined effects of climate warming and plant diversity loss on above-and below-ground grassland productivity. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60(1): 95-104.
- [20] Wada N, Shimoni M, Miyamoto M, Kojima S. Warming effects on shoot developmental growth and biomass production in sympatric evergreen alpine dwarf shrubs *Empetrum nigrum* and *Loiseleuria procumbens*. *Ecological Research*, 2002, 17(1): 125-132.
- [21] Sandvik S M, Heegaard E, Elven R, Vandvik V. Responses of alpine snowbed vegetation to long-term experimental warming. *Ecoscience*, 2004, 11(2): 150-159.
- [22] Danby R K, Hik D S. Responses of white spruce (*Picea glauca*) to experimental warming at a subarctic alpine treeline. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 437-451.
- [23] Yang L D, Yang Y, Wang G X, Guo J Y, Yang Y. Short-term effects of warming on growth and stoichiometrical characteristics of *Abies fabii* (Mast.) Craib seedling in Gongga mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(13): 3668-3676.
- [24] Zhang Y Q, Welker J M. Tibetan alpine tundra responses to simulated changes in climate: aboveground biomass and community responses. *Arctic and Alpine Research*, 1996, 28(2): 203-209.

- [25] Yang B, Wang J C, Zhang Y B. Effect of long-term warming on growth and biomass allocation of *Abies faxoniana* seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5994-6000.
- [26] Li N, Wang G X, Yang Y, Gao Y H, Liu L A, Liu G S. Short-term effects of temperature enhancement on community structure and biomass of alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 895-905.
- [27] Han W X, Fang J Y. Review on the mechanism models of allometric scaling laws: $3/4$ VS. $2/3$ power. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(4): 951-960.
- [28] West G B, Brown J H, Enquist B J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 1997, 276(5309): 122-126.
- [29] West G B, Brown J H, Enquist B J. A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. *Nature*, 1999, 400(6745): 664-667.
- [30] West G B, Brown J H, Enquist B J. The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organisms. *Science*, 1999, 284(5420): 1677-1679.
- [31] Enquist B J, Niklas K J. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants. *Science*, 2002, 295(5559): 1517-1520.
- [32] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 2006, 12(1): 84-96.
- [33] Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, Han W X. Above-and belowground biomass allocation in Tibetan grasslands. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 20(1): 177-184.
- [34] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Guo D L, Mohammad A. Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(2): 268-277.
- [35] Wang L, Niu K C, Yang Y H, Zhou P. Patterns of above-and belowground biomass allocation in China's grasslands: evidence from individual-level observations. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 851-857.
- [36] Zhang W G, Li S X, Wu T H, Pang Q Q. Changes of the differences between ground and air temperature over the Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(9): 899-910.
- [37] Wang C H, Cui Y. Characteristics of the difference of temperature between surface and atmosphere over the Tibetan Plateau in the early stage of East Asian summer monsoon onset. *Climatic and Environmental Research*, 2011, 16(5): 586-596.

参考文献:

- [8] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 1-8.
- [9] 尹华军, 赖挺, 程新颖, 蒋先敏, 刘庆. 增温对川西亚高山针叶林内不同光环境下红桦和岷江冷杉幼苗生长和生理的影响. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1072-1083.
- [10] 王谋, 李勇, 白宪洲, 黄润秋. 全球变暖对青藏高原腹地草地资源的影响. *自然资源学报*, 2004, 19(3): 331-336.
- [11] 石福孙, 吴宁, 罗鹏. 川西北亚高山草甸植物群落结构及生物量对温度升高的响应. *生态学报*, 2008, 28(11): 5286-5293.
- [12] 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] 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.
- [14] 赵新全. 高寒草甸生态系统与全球变化. 北京: 科学出版社, 2009: 1-32.
- [15] 徐振锋, 胡庭兴, 张远彬, 鲜骏仁, 王开运. 模拟增温引发的早春冻害: 以岷江冷杉为例. *生态学报*, 2009, 29(11): 6275-6280.
- [16] 徐振锋, 胡庭兴, 张力, 张远彬, 鲜骏仁, 王开运. 青藏高原东缘林线交错带糙皮桦幼苗光合特性对模拟增温的短期响应. *植物生态学报*, 2010, 34(3): 263-270.
- [17] 张立荣, 牛海山, 汪诗平, 李英年, 赵新全. 增温与放牧对矮嵩草草甸 4 种植物气孔密度和气孔长度的影响. *生态学报*, 2010, 30(24): 6961-6969.
- [23] 羊留冬, 杨燕, 王根绪, 郭剑英, 杨阳. 短期增温对贡嘎山峨眉冷杉幼苗生长及其 CNP 化学计量学特征的影响. *生态学报*, 2011, 31(13): 3668-3676.
- [25] 杨兵, 王进闯, 张远彬. 长期模拟增温对岷江冷杉幼苗生长与生物量分配的影响. *生态学报*, 2010, 30(21): 5994-6000.
- [26] 李娜, 王根绪, 杨燕, 高永恒, 柳林安, 刘光生. 短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响. *生态学报*, 2011, 31(4): 895-905.
- [27] 韩文轩, 方精云. 幂指数异速生长机制模型综述. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 951-960.
- [35] 王亮, 牛克昌, 杨元合, 周鹏. 中国草地生物量地上-地下分配格局: 基于个体水平的研究. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 642-649.
- [36] 张文纲, 李述训, 吴通华, 庞强强. 青藏高原地气温差变化分析. *地理学报*, 2006, 61(9): 899-910.
- [37] 王澄海, 崔洋. 东亚夏季风建立前青藏高原地气温差变化特征. *气候与环境研究*, 2011, 16(5): 586-596.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 7 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on chemical communication of development and host-finding of nematodes ZHANG Bin, HU Chunxiang, SHI Jin, et al (2003)
- Principles, indicators and sampling methods for species monitoring XU Haigen, DING Hui, WU Jun, et al (2013)

Autecology & Fundamentals

- Spatial distribution pattern of human-caused fires in Hulunbeir grassland ZHANG Zhengxiang, ZHANG Hongyan, LI Dongxue, et al (2023)
- Belowground biomass in Tibetan grasslands and its environmental control factors YANG Xiuqing, HUANG Mei, WANG Junbang, et al (2032)
- Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 CHEN Chao, ZHOU Guangsheng (2043)
- Winter bed-site selection by roe deer (*Capreolus capreolus*) in Huangnihe Nature Reserve ZHU Hongqiang, GE Zhiyong, LIU Geng, et al (2054)
- Leaf anatomical characteristics of the plants of grasslands in the Tibetan Plateau LI Quanfa, WANG Baojuan, AN Lihua, et al (2062)
- A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (2071)
- Cytological study on microsporogenesis of *Solanum lycopersicum* var. Micro-Tom under high temperature stress PENG Zhen, CHENG Lin, HE Yanjun, et al (2084)
- A new plant height growth process model of *Caragana* forest in semi-arid loess hilly region ZHAO Long, WANG Zhenfeng, GUO Zhongsheng, et al (2093)
- Germination inhibitory substances extracted from the seed of seven species of *Quercus* LI Qingmei, LIU Yan, LIU Guangquan, et al (2104)
- Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis* CHEN Dongqing, HUANGFU Chaohe, LIU Hongmei, et al (2113)
- Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat ... SHEN Zhangjun, OU Zulan, TIAN Shengni, et al (2121)
- Changes of soil chemical properties after different burning years in typical steppe of Yunwun Mountains LI Yuan, CHENG Jimin, WEI Lin, et al (2131)
- Effects of water and fertilizers on nitrate content in tomato fruits under alternate partial root-zone irrigation ZHOU Zhenjiang, NIU Xiaoli, LI Rui, et al (2139)
- Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas LI Juan, LIAO Hongkai, LONG Jian, et al (2147)
- Mobilization of inorganic phosphorus from soils by five azotobacters ZHANG Liang, YANG Yuhong, LI Qian, et al (2157)
- Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd ZHANG Chengxiang, CHEN Weifeng (2165)
- The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge TIE Mei, SONG Linlin, HUI Xiujuan, et al (2173)
- LAI-based photosynthetic light response model and its application in a rainfed maize ecosystem SUN Jingsong, ZHOU Guangsheng (2182)
- The dominant species of predatory natural enemies of three kinds of planthoppers and impact of pesticides on natural enemies in paddy field LIN Yuan, ZHOU Xiazhi, BI Shoudong, et al (2189)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial and temporal variation of picophytoplankton in the Pearl River Estuary ZHANG Xia, HUANG Xiaoping, SHI Zhen, et al (2200)

Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the Lower Reaches of Tarim River, China	CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, CHEN Yaning, et al (2212)
Fish species composition and community pattern in the continental shelf of northwestern South China Sea	WANG Xuehui, LIN Zhaojin, DU Feiyan, et al (2225)
Distribution and succession of plant communities in Lake Bita coastal swamp on the plateau region, northwestern Yunnan	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang (2236)
Analysis on community structure and quantitative characteristics of <i>Nitraria tangutorum</i> nebkhas at different succession stage in lower reaches of Shiyang River	JIN Hujia, MA Quanlin, HE Mingzhu, et al (2248)
Resource and Industrial Ecology	
Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat	ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (2260)
Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions	ZHANG Dabin, YAO Pengwei, LI Jing, et al (2272)
Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming	LI Rong, HOU Xianqing, JIA Zhikuan, et al (2282)
Urban, Rural and Social Ecology	
Effects of riparian buffers of North Mort of Beijing on air temperature and relative humidity	WU Fangfang, ZHANG Na, CHEN Xiaoyan (2292)
Characteristics of spatial and temporal variations of global solar radiation in Xi'an and relevant response in urban development	ZHANG Hongli, ZHANG Naweirui, LIU Minru, et al (2304)
Research Notes	
A analysis of macrofungal flora diversity in Langyashan Nature Reserve, Anhui Province, China	CHAI Xinyi, XU Xuefeng, WANG Meiyong, et al (2314)

《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,探索自然奥秘,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 陈利顶

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 7 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 7 (April, 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