



青藏高原芨芨草型温性草原不同土地利用方式的理论碳增汇潜力比较

张法伟¹, 韩道瑞^{1,2}, 郭小伟^{1,2}, 李以康¹, 曹广民^{1*}

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:于2009年7~8月对青藏高原芨芨草(*Achnatherum splendens*)型温性草原主要分布区的4种土地利用类型——原生草地、退化草地、农田耕种和退耕还草区的土壤容重、土壤有机碳含量和植物地上、地下生物量进行对比研究,以探讨土地利用方式对青藏高原草地生态系统碳储垂直分布的影响。结果表明,土地利用方式显著影响着浅层(0~20 cm)土壤容重和地下生物量($P < 0.05$);农田耕种和退耕还草对土壤有机碳含量的影响程度可深达60 cm;农田耕种区和退耕还草区的地上生物量极显著高于原生草地区和退化草地区($P < 0.01$);原生草地、退化草地、农田耕种区和退耕还草区的系统(植物+0~40 cm土壤)碳储分别为122.84、108.82、130.68和108.99 $t \cdot hm^{-2}$;以原生草地区地下系统碳储为参照,退化草地、农田耕种区和退耕还草区的增汇潜力分别为14.05、-6.38和14.88 $t \cdot hm^{-2}$,但增汇的时间效益和经济效益区别较大。

关键词:土壤容重;土壤有机碳;地上、地下生物量;系统碳储

中图分类号: Q148 **文献标志码:** A

Response of Potential Carbon Sequestration Capacity to Different Land Use Patterns in *Achnatherum splendens* Grassland in Qinghai-Tibetan Plateau

ZHANG Fa-wei¹, HAN Dao-rui^{1,2}, GUO Xiao-wei^{1,2}, LI Yi-kang¹, CAO Guang-min^{1*}

(1 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To understand the influence on grassland ecosystem carbon stock vertical profiles and carbon services function for land use changes, we surveyed the soil bulk density, soil organic carbon, aboveground and belowground biomass under 4 different land use patterns (native grassland, degraded grassland, cultivation and plantation) in main temperate grassland region on the Qinghai-Tibetan Plateau from July to August in 2009. The results showed that soil bulk density and belowground biomass of 0~20 cm depth was remarkably influenced by land use patterns ($P < 0.05$). Plantation and cultivation had significantly impacted soil organic carbon and been even up to 60 cm deep. Aboveground biomass of cultivation and plantation was much more enhanced than that of native and degraded grassland ($P < 0.01$). The ecosystem carbon stock (plant+0~40 cm soil) of native, degraded grassland, cultivation and plantation was 122.84, 108.82, 130.68 and 108.99 $t \cdot hm^{-2}$, respectively. The carbon sequestration potential was defined as the difference with belowground carbon stock of native grassland and was 14.05, -6.38 and 14.88 $t \cdot hm^{-2}$. However, there would be much more different in time-consuming and economy-investing.

收稿日期: 2011-05-13; 修改稿收到日期: 2011-06-27

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-06); 国家自然科学基金项目(30874529和31070437)

作者简介: 张法伟(1981-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事草地生态系统物质循环研究。E-mail: fangzhang@gmail.com

* 通讯作者: 曹广民, 研究员, 主要从事土壤生态研究。E-mail: Caogm@nwipb.cas.cn

Key words: soil bulk density; soil organic carbon; above-below ground biomass; carbon stock

由于温室气体剧增所引起的气候变暖、降水改变、极端气候频发和生物多样性降低等全球变化问题,不仅成为科学界的研究热点和重点,而且已经成为各国政府的政治和经济问题^[1-2]。北半球中高纬度的陆地生态系统作为重要的“未知”碳汇^[3],对土地利用格局的变化十分敏感^[4-5]。优化土地利用格局,增强陆地生态系统碳吸收和贮存时效,借此抵消部分CO₂的排放,已经成为全球变化生态学研究热点之一^[6-7]。已有的研究证实了退化土地经过合适管理不仅能抵消碳排放^[8-9],而且有利于缓解“粮食危机”^[10]。

青藏高原面积巨大,草地土壤有机碳储量高达全国的23%,占全球土壤碳库的2%^[11],但因土壤和植被不同而存在着较强的空间异质性^[12]。土壤呼吸和土地利用格局的变化作为青藏高原草地有机碳释放的两种主要途径而备受关注^[11-13],尤其是后者作用更加突出^[9]。原生草地区转变为退耕还草区和农田耕种区之后,在经历10~15年的非线性渐进式降低之后,达到平衡态^[14],土壤碳储量分别降低了大约10%和59%^[5]。而高寒原生草地在逆向演替为退化草地的过程中,地下碳储将逐渐升高再降低,但其高峰期也是生态系统濒临崩溃的阶段^[15]。以往研究多集中在高寒或低海拔草地区域^[11-12,16-17],对高海拔地区温性草原的研究较少^[18]。芨芨草型温性草原是环青海湖区域的重要植被类型,生境独特,少雨且土壤盐碱性强,物种多为集群分布^[19],在全球气候变化和人类活动加剧的双重压力下^[20],群落退化严重,土地利用格局发生剧变^[21]。本试验通过研究原生草地、退化草地、农田耕种和退耕还草等4种土地利用方式下芨芨草型温性草原生态系统碳储分布的差异,初步探讨该生态系统碳增汇的理论潜力,为中国温室气体减排谈判提供数据支撑^[13]。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

本次研究区域主要集中在环湖区域(青海湖南、北、西岸和河卡农场)和贵南、同德牧场等6个重要芨芨草型温性草原分布区(图1)。该区域原生芨芨草植被群落主要为芨芨草斑块和针茅斑块^[22],伴生种多为赖草(*Leymus secalinus*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、阿尔泰狗

哇花(*Heteropappus altaicus*)、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)、矮火绒草(*Leontopodium num*)、甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)和异叶青兰(*Dracocephalum heterophyllum*)等。

其中,原生草地区多为冬春牧场,放牧强度低;退化草地区多为“黑土滩型”或裸生草地,植被也以狼毒(*Euphorbia pallasii*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、矮火绒草、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)等杂毒草为主,多为夏季牧场,放牧强度高;退耕还草区以种植垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、燕麦(*Avena sativa*)和碱茅(*Puccinellia distans*)为主,退耕年限多为5~8年;农田耕种区则以油菜、青稞为主,开垦年限多为20年以上。

1.2 样品采集和指标测定

本次采样时间集中于2009年7~8月的植物生长旺盛期。在每个采样点内,选取原生草地、退化草地、农田耕种和退耕还草等4种土地利用方式的典型区域,对土壤和植被进行平行取样。在每种土地利用方式下,半随机选取等距的10个50 cm×50 cm样方。每个样方的土壤样品采用内径7 cm的土钻进行10次随机重复采样,然后同层混合装入布袋,采样深度依次为0~10、10~20、20~40、40~60和60~80 cm;地下生物量采用收获法与土壤样品同步获取;土壤容重则采用根钻法和环刀法配合,按照土壤样品的采样深度分层获取,每个样方每层取

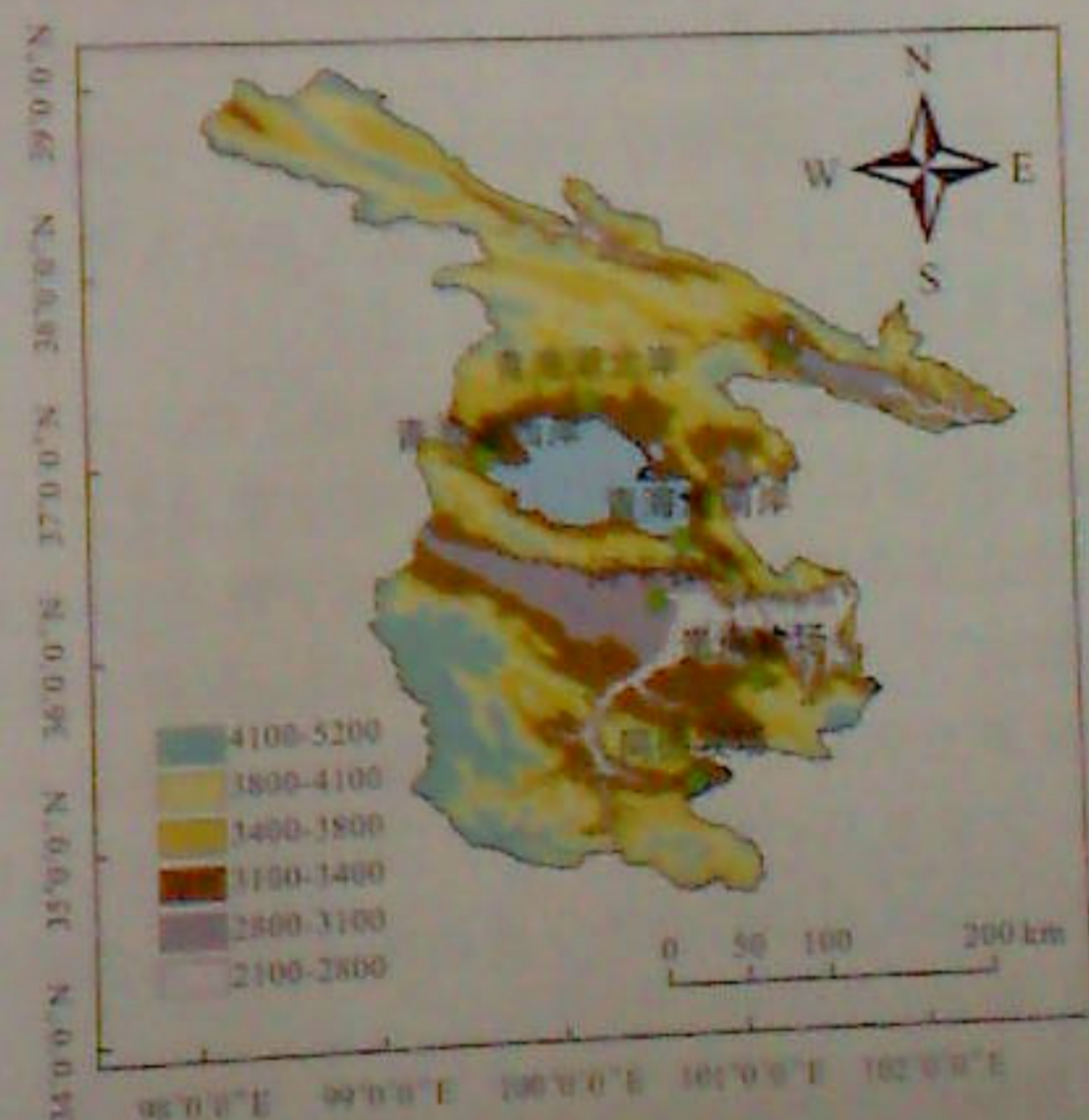


图1 青藏高原芨芨草型温性草原采样点示意图
Fig. 1 Survey plots of *A. splendens* grassland in Qinghai-Tibetan Plateau

样1次^[13],植物地上生物量和凋落物则根据收获法采用50 cm×50 cm的样方框获取,每个采样点下的每种土地利用方式进行5次重复。

植物地下、地上生物量和凋落物的干重在实验室用烘箱65℃恒温烘干至恒重后,用电子天平(精度为0.001 g)称重。土壤样品经室内风干、研磨、过1 mm筛后,用重铬酸钾氧化-外加热法(GB7857-87)测定其土壤有机碳含量^[22]。此次采样共取得土壤容重、土壤有机碳、地下和地上生物量、凋落物的有效数据分别为413、1420、152、1050个。其中深层(≥40 cm)容重、有机碳和地下生物量样品数量所占比例较低,分别为28.8%、26.0%和19.8%。

1.3 碳储量及其理论增汇潜力计算

土壤有机碳储(SOC)采用分层累计求和计算而得:

$$SOC = \sum_{i=1}^n \rho_i \times SOC_i \times D_i \quad (1)$$

式中, i 为第 i 土层, n 为主层数目, ρ_i 、 SOC_i 和 D_i 分别为第 i 层土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)、有机碳含量(%)和土层厚度(cm)。

地下生物量碳储(BBC)依据下式分层累计而得:

$$BBC = 0.45 \times \sum_{i=1}^n BB_i \quad (2)$$

式中, BB_i 为第 i 层土层内地下生物量干重,0.45为附近区域(青海海北高寒草地生态系统国家野外科学观测研究站,海北站,图1)高寒植被根系碳素含量^[23]。

地上植被碳储(AVC)主要由地上生物量和凋落物组成。在不考虑分解和转移情况下,其碳储为:

$$AVC = 0.37 \times (AB + L) \quad (3)$$

式中, AB 为地上生物量干重($g \cdot m^{-2}$), L 为凋落物干重($g \cdot m^{-2}$),0.37同为海北站区域的高寒植被地上碳素含量^[24]。

在计算理论增汇潜力时,由于地上部分多被采食或收获,而且其碳素储量的时效性较低(多为1年),因此仅考虑地下部分(土壤+地下根系)系统碳增汇潜力^[13]。结合前人的研究结果^[13],同时考虑到青藏高原土壤发育年青,土层较浅^[11-12],因此以0~40 cm为变化层,以退化草地区、农田耕种区、退耕还草区与原生植被区的地下系统碳储的差值为其理论增汇潜力。

1.4 数据统计分析

用SPSS 15.0(SPSS Inc, USA)的单因素方差分析(One way ANOVA)进行不同土地利用格局下土壤容重、土壤有机碳、地下和地上生物量及凋落物

量差异显著性检验,组间用LSD进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 芨芨草型草原不同土地利用方式下土壤容重比较

图2显示,土地利用方式的改变仅对浅层土壤容重(≤ 20 cm)产生了一定的影响。其中,在0~10 cm的土层中,土壤容重表现为农田耕种区($1.30 g \cdot cm^{-3}$)>退化草地区($1.25 g \cdot cm^{-3}$)>原生草地区($1.17 g \cdot cm^{-3}$)>退耕还草区($1.13 g \cdot cm^{-3}$),但仅有农田耕种区与退耕还草区之间差异显著($P < 0.05$)。在10~20 cm土层中,农田耕种区的土壤容重与退化草地区无显著差异,但显著大于退耕还草区($P < 0.05$),极显著高于原生草地区($P < 0.01$)。在0~20 cm土层中,退化草地区的土壤容重仅显著高于原生草地区($P < 0.05$),而原生草地区与退耕还草区之间无显著差异。其主要原因可能在于农田耕种区浅层地下根系相对较少,而退化草地区的地下根系多为死亡根系,根土比较大,致使土壤容重较小。20 cm以下土层的土壤容重对土地利用方式均无显著响应。该结果也印证了浅层土壤容重是对土地利用响应的最敏感指标^[4]。

2.2 芨芨草型草原不同土地利用方式下土壤有机碳含量比较

芨芨草型草原不同土层土壤有机碳含量均对土

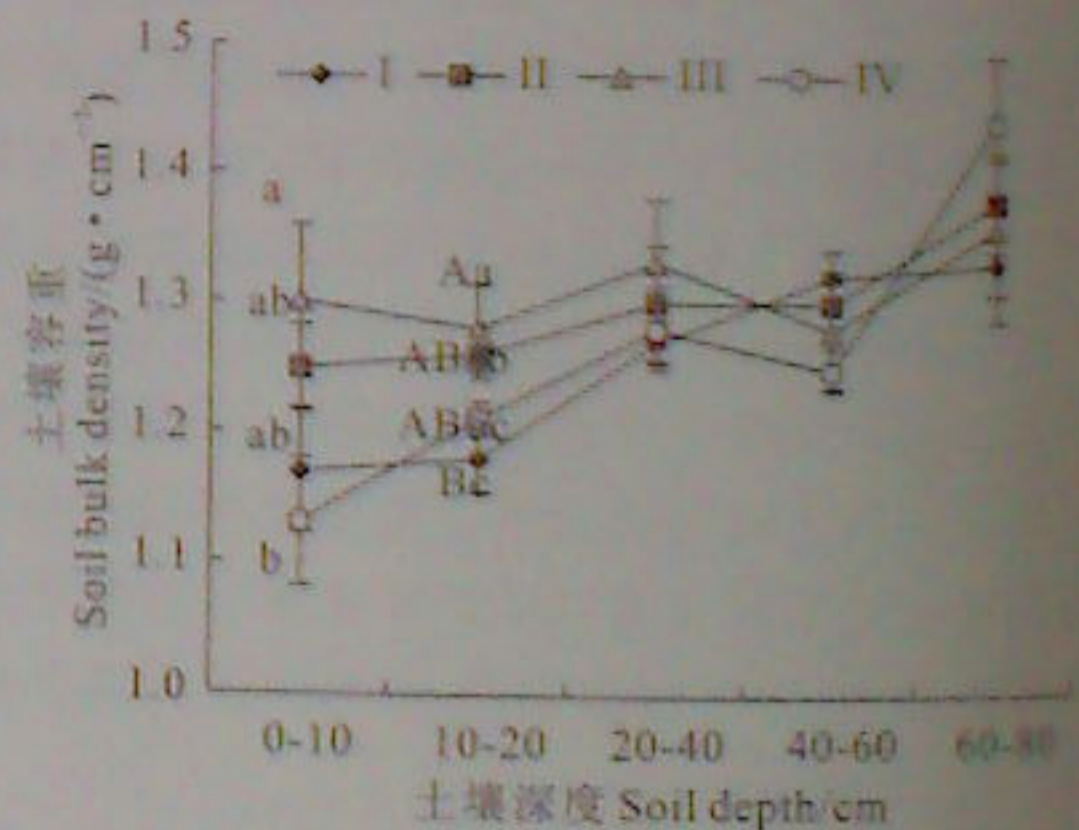


图2 芨芨草型草原不同深度土壤容重对不同土地利用方式的响应

I. 原生草地; II. 退化草地; III. 农田耕种区; IV. 退耕还草区; 不同大小写字母表示在0.01和0.05水平差异显著,下同

Fig. 2 Response of soil bulk density to different land use patterns in *A. splendens* grassland

I. Native grassland; II. Degraded grassland; III. Cultivation region; IV. Plantation region; Different capital and normal letter indicate significant difference at 0.01 and 0.05 level, respectively; The same as below

地利用方式表现出显著响应(图3)。在0~20 cm 浅层土层中,原生植被区土壤有机碳含量均极显著高于其他3种土地利用方式($P < 0.01$),而后三者之间无显著差异。在20~40 cm 土层中,农田耕种区的土壤有机碳含量最大(2.35%),极显著高于另外3种利用格局($P < 0.01$),说明耕作会造成土壤有机碳的均匀化,使得表层土壤碳向下淋溶与重新淀积;退耕还草区土壤有机碳含量和原生草地区之间无显著差异,但极显著高于退化草地区($P < 0.01$);原生草地区土壤有机碳含量虽略高于退化草地区,但二者之间无显著差异。在40~60 cm 土层中,退耕还草区土壤有机碳含量显著高于农田耕种区($P < 0.05$),这两者又极显著高于原生草地区和退化草地区($P < 0.01$);原生草地区与退化草地区之间无显著差异。在60~80 cm 土层中,仅退耕还草区土壤有机碳含量极显著高于农田耕种区($P < 0.01$),其余土地利用格局间无显著差异。可见,土地利用方式对土壤有机碳含量的影响较为复杂,浅层以原生草地区最高,但深层(≥ 40 cm)则以退耕还草区(或农田耕种区)最大。

2.3 芨芨草型草原不同土地利用方式下植物地下生物量比较

芨芨草型草原地下生物量对土地利用方式的响应(图4)与土壤容重的相似。0~40 cm 土层的地下生物量在土壤利用方式间表现出显著差异。在0~10 cm 土层中,除农田耕种区地下生物量与退耕还草区之间差异不显著外,其余利用方式之间的差异均极显著($P < 0.01$)。在10~20 cm 土层中,原生植被区的地下生物量极显著高于另3种利用方式($P < 0.01$);退化草地区显著高于退耕还草区($P <$

0.05),但与农田耕种区之间无差异,而后两者之间也无显著差异。在9~40 cm 土层中,原生植被区地下生物量极显著高于另外3种利用格局方式($P < 0.01$),但三者之间没有表现出显著差异。而在40~80 cm 土层中,土地利用方式对地下生物量没有显著影响。

另外,植物群落地下根系的垂向特征可采用渐近方程 $y=1-\beta^d$ 表示(d 为土层深度, y 为 d cm 土层地下生物量所占总地下生物量比例, β 为深度系数^[23])。经拟合可知,本实验中退耕还草区、原生草地区和退化草地区的深度系数分别为0.91、0.90和0.87,表现为浅根特征;而农田耕种区的为0.95,则表现出一定的深根特征。

2.4 芨芨草型草原不同土地利用方式下植物地上生物量和凋落物重量比较

芨芨草型草原地上生物量对不同土地利用方式的响应趋势(图5)与表层(0~10 cm)地下生物量的恰好相反。由于利用目的不同,农田耕种区的地上生物量极显著高于退耕还草区、原生草地区和退化草地区($P < 0.01$)。而退耕还草区生物量显著高于原生草地区和退化草地区($P < 0.01$),而后两者之间无显著差异。至于地上凋落物,除退耕还草区凋落物重量极显著高于原生草地区外($P < 0.01$),其余土地利用方式之间无显著区别。土地利用的目的决定了这种格局,农田耕种区和退耕还草区以收获地上部分为主,而原生草地区和退化草地区则为畜牧长期服务。

2.5 芨芨草型草原不同土地利用方式下碳增汇理论潜力比较

由于牲畜采食和农作物的收获,地上生物体固

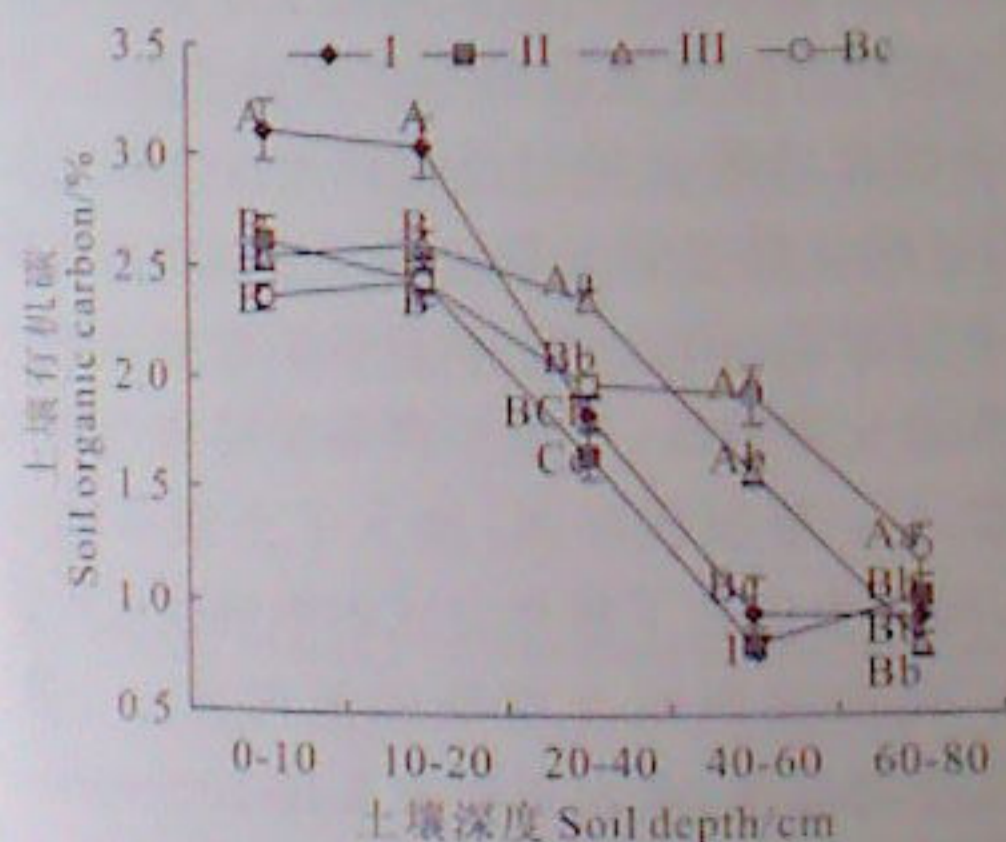


图3 芨芨草型草原不同深度土壤有机碳对不同土地利用方式的响应

Fig. 3 Response of soil organic carbon to different land use patterns in *A. splendens* grassland

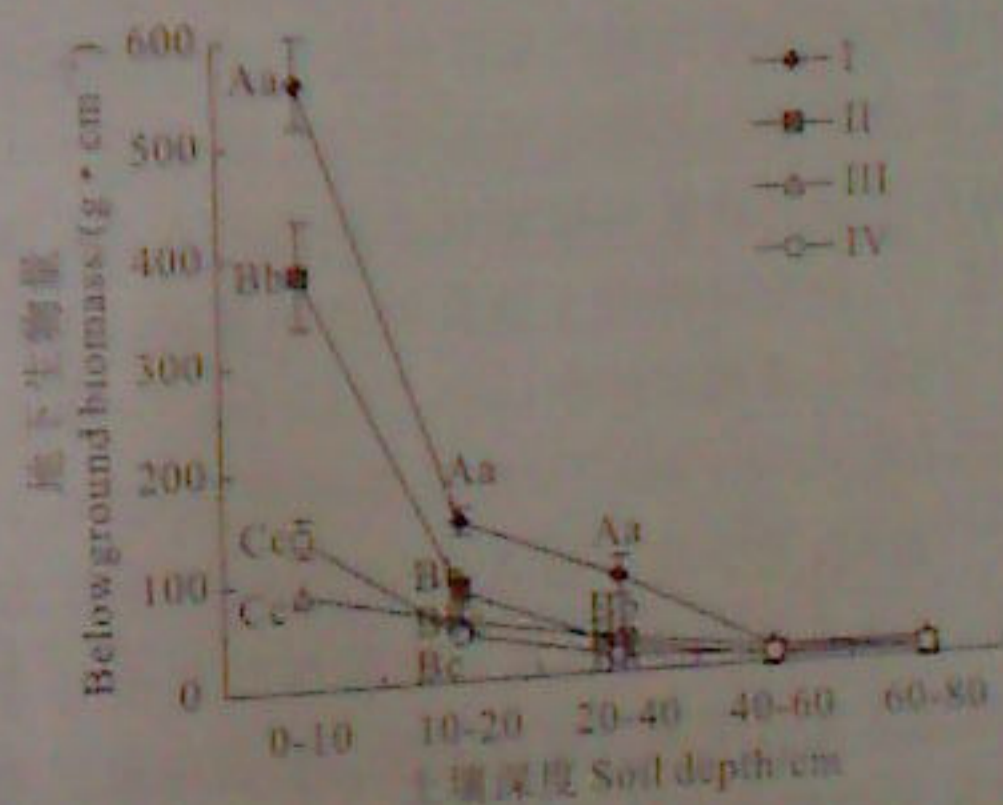


图4 芨芨草型草原不同深度地下生物量对不同土地利用方式的响应

Fig. 4 Response of belowground biomass in different land use patterns in *A. splendens* grassland

表 1 不同土地利用方式下芨芨草型草原碳储量和理论增汇潜力
Table 1 Carbon stock and potential carbon sequestration capacity under different land use patterns in *A. splendens* grassland

指标 Index	原生草地 Native pasture	退化草地 Degraded pasture	农田耕种区 Cultivation	退耕还草区 Plantation
土壤碳储 Soil carbon stock/(t·hm ⁻²)	118.72±0.12	106.05±0.14	127.92±0.10	106.52±0.09
根系碳储 Root carbon stock/(t·hm ⁻²)	3.59±0.33	2.21±0.32	0.77±0.11	0.91±0.13
地上碳储 Aboveground carbon stock/(t·hm ⁻²)	0.53±0.05	0.56±0.11	1.99±0.15	1.56±0.13
生态系统碳储 Ecosystem carbon stock/(t·hm ⁻²)	122.84±0.50	108.82±0.57	130.68±0.37	108.99±0.35
理论增汇潜力 Potential carbon sequestration/(t·hm ⁻²)	0	14.05	-6.38	14.88

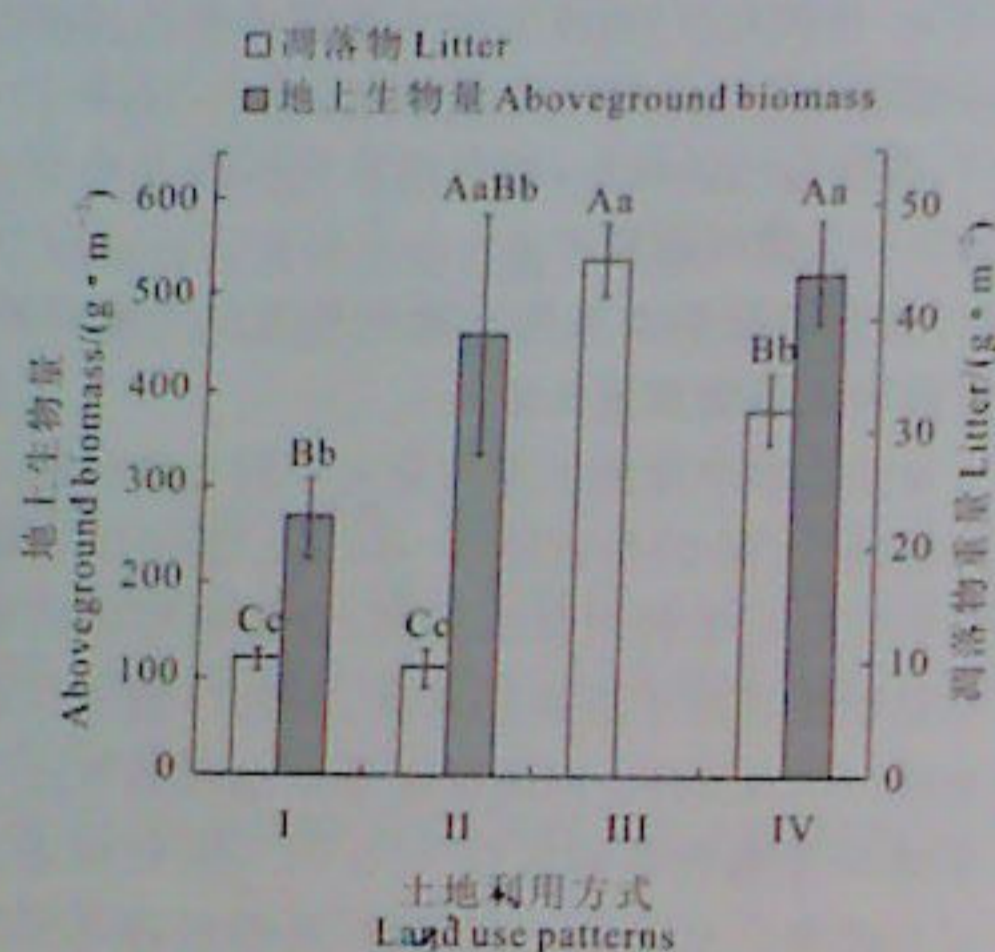


Fig. 5 芨芨草型草原地上生物量和凋落物重量
对不同土地利用方式的响应

不同的大写和小写字母分别表示土地利用方式间
在 0.01 和 0.05 水平存在显著性差异

Fig. 5 Response of aboveground biomass and litter to
different land use patterns in *A. splendens* grassland
The different capital and normal letters represent
significant difference among land use patterns
at 0.01 and 0.05 level, respectively

定的碳素转移较快而时效性较差,会很快返回到大气中。草地生态系统碳的增汇潜力主要考虑 0~40 cm 土壤有机碳的储量和植物根系碳储的差异。本试验中(表 1),农田耕种区土壤碳储含量最高(127.92 t·hm⁻²),原生草地区居中(118.72 t·hm⁻²),而退化草地区(106.05 t·hm⁻²)和退耕还草区(106.52 t·hm⁻²)最低;至于地下根系碳储含量,以原生草地区最高,退化草地区居中,农田耕种区和退耕还草区最低,而地上部分碳储含量则相反。农田耕种区和原生草地区的系统总碳储量较高,而退耕还草区和退化草地区的则较低,其中土壤碳储依次分别贡献了系统总储量的 96.6%、97.4%、97.9%和 97.7%,印证了生态系统碳贮管理的归宿在于土壤^[6];退耕还草区和

退化草地区的理论增汇潜力较高,分别为 14.05 和 14.88 t·hm⁻²,而由于人工施肥强度较大,致使农田耕种区的有机碳含量较高,同时由于其 20~40 cm 土壤容重较大(图 2),其系统碳储含量最大,致使增汇潜力为负(-6.38 t·hm⁻²)。

3 讨论

土地利用方式的改变,影响了草地植被群落的多样性和稳定性,改变了土壤有机碳的输入和微生物的组成和活性^[20],进而影响了土壤碳库的碳收支^[24]。本试验研究结果表明芨芨草型温性草原的原生植被区的土壤表层有机碳含量最高,而退化草地、退耕还草区和农田耕种区之间无显著差异。其主要原因是以过度放牧为主要利用途径的退化草地,在风蚀和水蚀的影响下,系统有机碳输入降低^[25],致使其表层土壤有机碳明显低于原生草地。但过度放牧的影响程度在 20~40 cm 土层处消失殆尽,说明凋落物和腐殖质对土壤有机碳的影响随着土壤深度的增加而降低^[26]。而以耕作制度为主的退耕还草区和农田耕种区,土壤侵蚀强度更大,土壤有机质的矿化速度更高^[10],但由于存在高强度的有机和无机施肥,而且有机肥能加速土壤有机碳的积累^[19],存在着一定强度的有机碳补偿途径,因此其土壤表层有机碳含量与退化草地区之间无显著差别,但还明显低于原生草地区。然而农田耕种和退耕还草深层(≥40 cm)土壤有机碳含量显著高于原生区和退化草地区,这由于耕翻使植物残体和施肥材料混入土壤较深层次,加大了土壤深层碳的输入^[7],同时也印证了耕作方式的影响强度较放牧利用大。而作为影响土壤碳储量的另一个重要因子——土壤容重,在农田耕种区其 20~40 cm 土层的土壤容重和土壤有机碳高达 1.33 g·cm⁻³和 2.35%,分别比原生草地区高 5.01%和 27.8%,致使农田耕种区的土壤碳储最大。如果利用土壤容重和植物根系的改变量来校正土层深度^[12],农田耕种

恢复为原生草地后,其0~10、10~20和20~40 cm 土层分别升高0.93、0.86和1.00 cm(单位干根的 体积为 3.01 cm^3),土壤碳储增加到 $128.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,表明芨芨草温性草原区对深度校正响应较弱,这和高寒草甸区别较大^[12]。但农田系统的 Q_{10} (土壤呼吸的温度敏感系数,温度每升高 10°C ,土壤呼吸增加的倍数)相对最大,如果利用格局不发生变化,在气候暖化情景下其碳增汇的潜力可能被大幅度削弱^[27]。

退耕还草区和退化草地区的理论增汇潜力相差较小,但因其固(有机)碳速率区别较大致使生态系统固碳时间和经济效益存在差异。退耕还草土壤有机碳累积速度受控于输入(施肥种类和强度、牧草品种和密度、留茬高度和耕作方式等)和输出(生态系统呼吸和侵蚀、矿化强度),比较复杂。依据三江源高寒退耕还草($0.49 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[28]和退林还草地($0.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[29]的固碳速率试验结果,可知退耕还草的理论增汇时间约为28.6年(本文取其平均值 $0.52 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。而退化草地通过降低放牧强度和围栏封育措施,其固碳速率分别为 0.77 和 $0.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[10],理论增汇时间为18.2年和17.1年。但必须说明的是,根据涡度相关仪器长期观测的研究结果,高寒原生草地是生态系统 CO_2 弱汇^[20-21],而退耕还草区和退化草地区的土壤有机碳恢复到原生草地状态之后,依旧可以作为碳汇吸收大气 CO_2 。

京都议定书和已有研究都表明适宜管理可以增强生态系统碳贮能力,但每个地区都具有特殊性和不确定性,探寻特定地区的适宜碳管理措施是核心^[40]。环青海湖区域的芨芨草型温性草原基本处于农牧交错区,人口压力是土地利用格局的主要驱动力^[17]。但随着总投资15多亿元的“青海湖流域生态环境保护与综合治理工程”的实施,政策导向可能导致土地利用格局发生较大的变化。从已有和本文的研究结果看,降低牧压或围栏封育不仅可以提

高退化草地系统的碳贮服务功能,而且有利于生态系统的稳定和可持续健康发展。原生草地开垦为农田耕地后,其碳贮功能甚至有所上升,其与森林地带的研究结果相反^[10],这因为森林区域的系统碳储较高,而耕作的补偿作用相对微弱。虽然以牺牲区域原始景观为代价,但农田耕地对稳定“移民工程”和解决“粮食危机”^[41]有所裨益。退耕还草的碳贮收益为负,但在水土保持、生物多样性和生态安全等方面作用突出。因此,该区域碳管理措施应以退化草地治理为主,同时积极发展高效农业和集约化畜牧业,在保证生产服务功能的同时,实现区域碳的生态补偿^[42]。

本研究表明,青藏高原芨芨草型温性草原对土地利用方式响应十分显著。农田耕种区的浅层(0~20 cm)土壤容重显著高于退化草地区,原生草地区第三,而退耕还草区最小,而深层土壤容重则无显著区别。农田耕种、退耕还草和放牧退化均显著降低了浅层土壤有机碳含量,农田耕种区的20~40 cm 土壤有机碳含量最高,退耕还草区和原生草地区居中,退化草地区最小;农田耕种区和退耕还草区的40~60 cm 土壤有机碳含量显著高于原生草地区和退化草地区。原生草地区地下生物量显著高于退化草地区,而后者浅层地下生物量又显著高于农田耕种区和退耕还草区;农田耕种区和退耕还草区的地上生物量极显著高于原生草地区和退化草地区,而凋落物量仅退耕还草区极显著高于原生草地区,其余无显著差异。原生草地区、退化草地区、农田耕种区和退耕还草区的系统(植物+0~40 cm 土壤)碳储分别为 122.84 、 108.82 、 130.68 和 $108.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,而土壤碳储的贡献均在96%以上;以原生草地区地下系统碳储为参照,退化草地、农田耕种和退耕还草的增汇潜力分别为 14.05 、 -6.38 和 $14.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,结合前人生态系统碳吸收的研究结果和土地利用方式的内在差异,其增汇的时间效益和经济效益具有较大的区别。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] DING ZH L(丁仲礼), DUAN X N(段晓男), et al. Control of atmospheric CO_2 concentration by 2050: An allocation on the emission rights of different countries[J]. Science of China, Series D: Earth Science(中国科学: D辑), 2009, 39(8): 1009-1027(in Chinese).
- [3] FANG J Y(方精云), PIAO SH L(朴世龙), ZHAO SH Q(赵淑清). The carbon sink, the role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystem in the northern hemisphere[J]. Acta Phytocologica Sinica(植物生态学报), 2001, 25(3): 394-502(in Chinese).
- [4] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential[J]. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317-327.

- [5] GUO L B, GIFFORD R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345-360.
- [6] ZHONG X B(钟学斌), YU G M(喻光明), HE G S(何国松), et al. Carbon storage loss during land readjustment and optimization of ecological compensation[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2006, 25(3): 303-308(in Chinese).
- [7] ZHAO SH W(赵世伟), LU L(卢 璐), LIU N N(刘娜娜), et al. Effects of ecosystem conversion on the characteristics of soil organic carbon in Ziwuling forest region[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2006, 26(5): 1 030-1 035(in Chinese).
- [8] LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, 123(1-2): 1-22.
- [9] BOLLIGER J, HAGEDORN F, et al. Effects of land-use change on carbon stocks in Switzerland[J]. *Ecosystems*, 2008, 11(6): 895-907.
- [10] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5 877): 1623.
- [11] WANG G X(王根绪), CHENG G D(程国栋), SHEN Y P(沈水平). Soil organic carbon pool of grasslands on the Tibetan Plateau and its global implication[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*(冰川冻土), 2002, 24(6): 693-700(in Chinese).
- [12] WU Y Q(吴雅琼), LIU G H(刘国华), FU B J(傅伯杰), et al. Study on the vertical distribution of soil carbon density in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Scientiarum Circumstantiae*(环境科学学报), 2008, 28(2): 362-367(in Chinese).
- [13] 陈洋勤, 王效科, 王礼茂. 中国陆地生态系统碳收支与增汇对策[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [14] SOUSSANA J F, LOISEAU P, VUICHARD N, et al. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands[J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20(2): 219-230.
- [15] CAO G M(曹广民), LONG R J(龙瑞军), ZHANG F W(张法伟), et al. A method to estimate carbon storage potential in alpine Kobresia meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2010, 30(24): 6 591-6 597(in Chinese).
- [16] WU R G, TIESSEN H. Effect of land use on soil degradation in alpine grassland soil, China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1 648-1 655.
- [17] TAO ZH(陶 贻), SHEN CH D(沈承德), GAO Q ZH(高全洲), et al. The impact of land use change on soil organic matter turnover of alpine meadow in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*(冰川冻土), 2007, 29(2): 217-225(in Chinese).
- [18] QIAO Y M(乔有明), WANG ZH Q(王振群), DUAN ZH H(段中华), et al. Effects of different land-use types on soil carbon and nitrogen contents in the northern region of Qinghai Lake[J]. *Acta Prataculturae Sinica*(草业学报), 2009, 18(6): 105-112(in Chinese).
- [19] ZHOU G Y(周国英), CHEN G CH(陈耳琛), WEI G L(魏国良), et al. Distribution patterns of major populations in *Achnatherum splendens* communities of Qinghai Lake area[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 2006, 26(3): 579-585(in Chinese).
- [20] CHI D, DAN L. Analysis to the driving force model and drives factor on the utilized changes of cultivated land in Qinghai Lake area[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2009, 10(5): 150-154.
- [21] HUAI H Y(淮虎根), WEI W H(魏万红), ZHANG Y L(张德镗). The characteristics of *Achnatherum splendens* community along the Qinghai-Tibet railway[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2007, 27(2): 497-503(in Chinese).
- [22] CHEN G CH(陈耳琛), PENG M(彭 敏). Community characteristics and distribution laws of *Achnatherum steppe* in Qinghai Province[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*(西北植物学报), 1993, 13(2): 154-162(in Chinese).
- [23] 刘光裕, 蒋能慧, 张连第. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法—土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [24] ZHANG J X(张金霞), CAO G M(曹广民), et al. The carbon storage and carbon cycle among the atmosphere, soil, vegetation and animal in the *Kobresia humilis* alpine meadow ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2003, 23(4): 627-634(in Chinese).
- [25] JACKSON R B, CANADELL J, EHLERINGER J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes[J]. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389-411.
- [26] LIU W N(刘文娜), WU W L(吴文良), WANG X B(王秀斌), et al. Effects of soil type and land use pattern on microbial biomass carbon[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*(植物营养与肥料学报), 2006, 12(3): 406-411(in Chinese).
- [27] WATSON R T, NOBLE I R, BOLIN B, et al. Land use, land-use change, and forestry[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [28] KANG M Y(康慕谊), LIU X C(刘肖慧), DONG SH K(董世魁), et al. Impacts of land use change and intensity on the grassland in Hulube Banner, Inner Mongolia[J]. *Advance in Earth Sciences*(地球科学进展), 2002, 17(2): 229-234(in Chinese).
- [29] LIN H L(林惠龙), LONG R J(龙瑞军), REN J ZH(任继周). Grazing induced erosion: review and prospect[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2008, 27(12): 2 222-2 227(in Chinese).
- [30] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [31] ZHAO L(赵 亮), GU S C(古 松), ZHOU H K(周华坤), et al. CO₂ fluxes of artificial grassland in the source region of the three rivers on the Qinghai Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Plant Ecology*(植物生态学报), 2008, 32(3): 544-554(in Chinese).