

doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0056

Li Hongqin, Li Yingnian, Zhang Fawei, et al. Variations of production and water use efficiency of the vegetation in alpine meadow[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 475-482. [李红琴, 李英年, 张法伟, 等. 高寒草甸植被生产量年际变化及水分利用率状况[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 475-482.]

高寒草甸植被生产量年际变化及水分利用率状况

李红琴^{1,2}, 李英年^{1,2*}, 张法伟^{1,2}, 刘晓琴^{1,3}, 吴启华^{1,3}, 毛绍娟^{1,3}

(1. 中国科学院 西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院 高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810001; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 分析了海北地区高寒草甸植被 2001—2011 年 11 a 耗水量、生物现存量、净初级生产量、水分利用率及其相关性, 结果表明: 植物生长期 5—9 月耗水量 416.30 mm, 植被地上净初级生产量 (ANPP)、地下净初级生产量 (BNPP) 以及总的净初级生产量 ($NPP = ANPP + BNPP$) 分别为 $393.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $945.26 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1\,338.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, BNPP 与 ANPP 之比为 2.404. 8 月底植被现存生物量达 $3\,422.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中地上和地下现存量分别为 $411.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $3\,011.85 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, BNPP 与 ANPP 之比高达 7.327, 说明植被现存量巨大, 归还土壤碳能力强. NPP 与 5—9 月植被耗水量相关性很差, 但与 5—9 月平均气温具有显著的正相关关系, 表明高寒草甸地区水分条件可满足植物生长的基本需求, 而同期温度是影响 NPP 提高的重要因素. 11 a 来 BNPP、ANPP 和 NPP 平均水分利用率分别为 $0.958 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $2.326 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $3.284 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$, 表明高寒草甸植被净初级生产具有较高的水分利用率.

关键词: 高寒草甸; 植被耗水量; 年际变化; 植被生物现存量; 植被净初级生产量; 水分利用率

中图分类号: Q948 文献标识码: A

0 引言

植被蒸散量监测是复杂的过程, 为此, 农业气象学家以植被耗水量替代植被蒸散量^[1-2]. 耗水量的年际变异是影响生态系统物质循环、植被净初级生产量及现存量年间差异的关键因素之一. 植物水分利用率是植物消耗单位水分所生产的同化物质的量, 反映了植物耗水与其干物质生产之间的关系, 是联系植被生态系统碳循环和水分循环的重要变量, 也是评价植物生长适宜程度的综合生理生态指标^[2-4]. 因此, 在理解植被耗水量的基础上, 了解植被水分利用率, 对把握和提高植被固碳能力具有一定的实际意义.

高寒草甸是青藏高原的重要草地资源, 支撑着青藏高原地区的畜牧业发展. 区域植被生产量高低

不仅直接或间接影响到区域居民的生活生计, 也关系到水涵养及水资源问题. 高寒草甸生态系统因海拔高、温度低、植物多以湿中生种类组成, 有着不同于低海拔植物生长发育的生态水文特点, 对气候和环境变化反应十分敏感. 虽然区域年降水量多在 400~700 mm, 但近年来高寒草甸地区自然降水与过去多年平均值基本保持不变的状况下气候温暖化加剧, 导致了土壤植被蒸散力加大, 土壤水分散失严重, 植被生长受水分胁迫影响更趋明显^[5-6]. 而且植被对大气降水和土壤水分的调节功能发生变化, 进而也将影响到植被水分利用率. 前人曾有关于青藏高原冻土区植物生长发育与环境因子关系的研究^[7-9], 而且我们也曾对高寒草甸地区的土壤水分动态变化特征、植被耗水量动态和耗水的季节动态变化等做过分析报道^[10-13], 但很少涉及植物水

收稿日期: 2012-09-11; 修订日期: 2013-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31270523; 31070437); 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05050601; XDA05050404); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB833501-01-13)资助

作者简介: 李红琴(1981-), 女, 河南三门峡人, 2012 年在中国科学院西北高原生物研究所获博士学位, 现主要从事全球变化生态学研究. E-mail: lihongqin_00@126.com

* 通讯作者: 李英年, E-mail: ynli@nwipb.cas.cn

分利用率状况。尽管研究者从我国不同地区的不同植被类型出发,讨论了消耗单位重量的水分所控制的干物质重量下的水分利用率、实际蒸散消耗单位重量的水分利用率等情况^[3-4],胡中民等^[14]从全国尺度出发用 CO₂ 通量变化下的水分利用率时联系了高寒草甸生态系统群体水平上水分利用率情况,但在对高寒草甸植被生产量的水分利用率方面的研究仍处空白。因此,联系大气降水-土壤水-植物循环系统的理论观点,探讨高寒草甸植被生产量年际变化下水分利用率状况,对高寒草甸植被碳库过程及循环十分重要。

1 资料和方法

1.1 试验区自然条件

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸进行。海北站地处青藏高原东北隅的青海省海北藏族自治州门源回族自治县境内,祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷西段,地理位置为 37°29′~37°45′ N, 101°12′~101°23′ E, 海拔 3 200~3 600 m。该试验区位于亚洲大陆腹地,具明显的高原大陆性气候,东南季风及西南季风微弱。受高海拔条件制约,气温极低,无明显四季之分,仅有冷暖季之别,干湿季分明,年平均气温-1.7℃,年平均降水量 560 mm 左右^[15]。土壤以洪积-冲积物、坡积-残积物及古冰川沉积物在不同水热条件及植被影响而形成的草毡寒冻锥形土(多在滩地、阳坡)、暗沃寒冻锥形土(多在阴坡)为主,土壤发育年青、土层浅薄、有机质含量丰富^[16]。实验的矮嵩草草甸主要分布在滩地、阳坡,草层高度为 10~20 cm,植物群落外貌整齐、均匀,植被总盖度多在 90%。除以矮嵩草为建群种外,主要优势种有垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、异针茅(*Stipa aliena*),伴生种有麻花苳(*Gentiana straminea*)、甘肃棘豆(*Oxytropis kansuensis*)、紫羊茅(*Festuca rubra*)、瑞苓草(*Saussurea nigrescens*)、青海凤毛菊(*Saussurea kokonorensis*)等^[17]。

1.2 研究资料

本实验样地位于海北站高寒矮嵩草草甸草场微气象-涡度相关法观测系统实验地。因高寒草甸植被基本在日均气温≥0℃(约在 4 月下旬)时开始萌动发芽,但此时底层土壤仍维持冻结现象,约在 5 月中旬土壤融化到 40 cm 以下土层,故土壤湿度测定以 5 月中旬开始,考虑到 9 月下旬高寒草甸分布

区日均气温下降到 5℃以下,植物基本停止生长而进入枯黄期,土壤湿度的测定在 9 月 30 日停止。自 2002 年涡度相关法观测系统架设以来,在每年植物生长期的 5—9 月,每隔 5 d 用土钻按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 和 50~60 cm 等 6 个层次观测土壤湿度,每次观测为 6 个重复,观测时若遇雨天则延后 2~3 d,用温度控制在 80℃烘箱烘干至恒重,测定土壤质量含水量(占干土重的百分比表示,%)。气象资料沿用微气象-涡度相关法观测系统同期观测资料。

生物量采用“收获法”获取。在 5—10 月每月的 15 日和 30 日前后,在试验区提前设计出 25 m×25 m 的观测区,并在 4 个角点及中心点固定位置标记后,以正北方向为准的 1 m 处,按顺时针方向每次观测时每间隔 50 cm 取样,即每次共 5 个 50 cm×50 cm 样方。取样时先收集枯落物装袋,再用剪刀齐地面剪取绿色植物装入纸袋;地下生物量在取过地上生物量的样方内以直径 8 cm 的根钻垂直按 0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm 三个层次 3 个重复取样(2006 年前为 25 cm(25 cm 的二级样方,用铁铲和切刀挖坑取样),用筛子筛选出草根装入布袋。将枯落物附带泥土等杂物清理,到河边将根系样品冲洗干净,然后置恒温控制在 80℃的烘箱,烘干至恒重后称重换算为 g·m⁻²。以 8 月底到 9 月初生物量达最高时的测定值为地上净初级生产量(aboveground net primary production, ANPP),而地下净初级生产量(belowground net primary production, BNPP)监测非常困难,一般采用周转量法^[18](即当年地下最大生物现存量与最小现存量差值)来估算。地上和地下净初级生产量之合就是总的净初级生产量(net primary production, NPP)

1.3 计算方法

1.3.1 植被耗水量的计算

地表水平衡公式为^[2]:

$$ET = P - f + R \pm \Delta W \pm \Delta Q \quad (1)$$

式中:ET 为耗水量(mm);P 为时段降水量(mm);f 为地表径流(mm);R 为灌溉量(mm);ΔW 为时段土壤贮水变化量(mm);ΔQ 为某一土壤深层水分渗漏或地下水补充量(mm)。海北高寒草甸植物根系主要分布在 0~20 cm^[17-18],40 cm 以下根系分布很少。草毡表层滞水性强,降水下渗不易超过根层,土壤 60 cm 处为石质接触面,60 cm 以下为含砾母质的砾石层,地下水位 3 m 左右,土壤毛管比例极低,地下水对土壤水补给较少,故取 ΔQ=0。

表 1 海北高寒草甸地区 2001—2011 年植物生长期耗水量、降水量、平均气温

Table 1 Water consumption, precipitation and mean temperature in growing period in Haibei alpine meadow from 2001 to 2011

	年份											平均
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
ET_{5-9}/mm	305.2	441.5	425.6	449.8	404.8	476.2	395.2	358.2	399.1	435.1	448.2	416.3
R_{5-9}/mm	297.7	424.6	458.3	443.6	373.1	471.6	423.7	349.7	449.9	427.9	447.5	415.2
$T_{5-9}/^{\circ}\text{C}$	7.66	7.93	7.22	7.28	8.34	9.08	9.34	9.04	9.13	8.68	8.06	8.34

注: ET_{5-9} 、 R_{5-9} 和 T_{5-9} 分别为植物生长期(5—9月)耗水量(mm)、降水量(mm)和平均气温($^{\circ}\text{C}$)。

同时, 由于实验地地形平坦, 地表植物生长茂密, 枯落物常存在并覆盖地面, 地表径流发生弱, 故可忽略地表径流($f=0$)。另外, 研究区受自然条件 and 生产方式的限制, 无灌溉($R=0$), 从而认为降雨是土壤水分的主要来源, 即土壤湿度的变化主要受降水的影响。表现出植被蒸腾消耗及土壤蒸发主要是表层土壤中的水分变化。而土壤贮水变化量(ΔW)由下式得到^[3]:

$$\Delta W = \sum_{L=1}^6 (E_{L1} - E_{L2}) \quad (2)$$

$$E_{Li} = 0.1 \times M \times R \times H \quad (3)$$

式中: E_{Li} 为第 L 层(共 6 个 10 cm 层次)计算时段初($i=1$)、末($i=2$)的土壤贮水量(mm); M 为土壤含水量(%); R 为实际测定的土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H 为土层深度(10 cm)。

1.3.2 植被生产碳量的水分利用率

在高寒草甸分布区, 其植物生长完全依靠于自然环境, 当然水分条件是影响植被生物量积累的重要因素之一。因此, 可用水分利用率来表示其植被生物碳量乃至植被净初级生产碳量的高低。其表达式为^[1, 14]:

$$WUE_i = \frac{NPP_i}{W} \quad (4)$$

式中: WUE_i 为植被净初级生产量($i=1, 2, 3$, 分别代表地上、地下和地上地下总的净初级生产量)的水分利用率, 系单位面积植物每耗水 1 mm 所能固定的有机干物质克数($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$); NPP_i 为植被净初级生产量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, i 同上); W 为植物生长期植被耗水量(mm)。

2 结果与分析

2.1 植物生长期植被生物碳量、耗水量年际分布及影响关系

在海北高寒草甸地区, 不同降水年份植被耗水量差异较大(表 1), 在降水少的年份(如: 2001 年 5

—9 月降水量为 297.7 mm)植被耗水量也较少(同期耗水量为 305.2 mm)。降水较丰富的年份, 植被耗水量较大(2006 年生长期降水量 471.6 mm, 同期耗水量为 476.2 mm)。表现出植物生长期耗水量与同期降水量成极显著的正相关关系($P < 0.01$, 图 1)。但也有极个别年份受植物生长季的日照时数较长, 平均气温较高等影响, 降水量与耗水量差异较大, 如 2005 年降水相对较少(植物生长期降水量为 373.1 mm), 耗水量达 404.8 mm。在大多数年份植物生长期内的耗水量大于自然降水量, 这主要受制于 4—5 月期间土壤融冻水的滞留补给的结果。但也出现降水大于同期耗水量的, 如 2003 年虽降水较为丰富(植物生长期为 458.3 mm), 但耗水量并不是最高, 比降水量少 23 mm, 这主要是因为该年植物生长期气温较低, 限制了湍流输送, 致使植被耗水量下降。统计计算 2001—2011 年高寒矮嵩草草甸植被生长季蒸散量发现, 耗水量占同期降水量的 90%以上, 说明在海北高寒矮嵩草草甸地区降水基本能满足植被生长所需水分, 同时也表明矮嵩草草甸大部分降水是通过蒸散过程所流失。2001—2011 年 11 a 间, 海北高寒矮嵩草草甸植物生长期植被耗水量平均为 416.3 mm, 与同期降水量(415.2 mm)相仿。

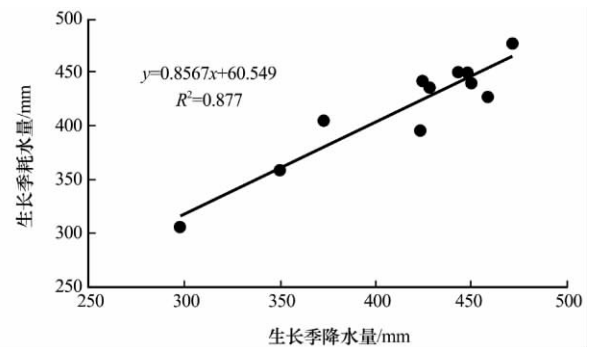


图 1 植物生长期降水量与植被耗水量的关系

Fig. 1 Relations between precipitation and water consumption of the vegetation in the growing period

2001—2011 年观测值表明, 海北高寒矮高草草甸植被 ANPP、BNPP 和 NPP 的 11 a 平均值分别为 $393.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $945.26 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1\,338.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。最高年份分别可达 $467.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (2009 年)、 $1\,328.10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (2008 年)、 $1\,784.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (2008 年); 最低年份分别为 $338.59 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (2003 年)、 $717.35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (2003 年)、 $1\,056.94 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (2003 年); 最高年份比最低年份分别高 27%、46% 和 41% (图 2)。图 2 也表明, ANPP 与 BNPP 之间有很好的协调同步变化规律, 只是 BNPP 比 ANPP 平均高 58 以上, 其 BNPP 与 ANPP 的比值 11 a 平均为 2.404, 在 2.004 (2010 年) 到 2.663 (2001 年) 之间波动。

统计分析 11 a 间 ANPP、BNPP 和 NPP 与同

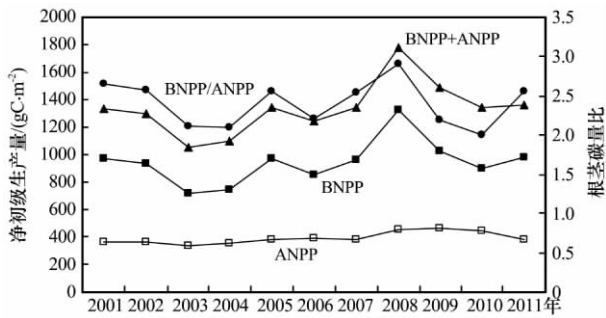


图 2 2001—2011 年植被净初级生产量的年际变化
Fig. 2 Interannual variations of NPP from 2001 to 2011

期植被耗水量之间的关系表明 (图 3), 其相关显著性很差, 且出现一定的负相关, 其中 BNPP 与同期植被耗水量之间的相关性可达到 $P < 0.1$ 的检验性水平 (图 3b)。但 ANPP、BNPP 和 NPP 分别与同期平均气温分别达到 $P < 0.01 \sim 0.05$ 的检验水平 (图 4)。该相关性表明, 高寒草甸植被耗水量可满足植物生长的基本需求。由于植被耗水量与同期降水量具有显著的相关性, 从而也进一步证实, 高寒草甸地区水分条件不是限制植被生长发育的主要因子。相反表明区域植物生长发育和植被净初级生产量受热量条件影响明显。但是, 我们也在研究中发现, 在植物生长旺盛时期的 6—7 月, 由于期间温度高、植物光合作用强度大, 植被的蒸腾加大, 需要大量的水分消耗, 导致该期间出现水分的亏缺, 期间生物累积量与同期耗水量有显著的正相关关系 [16]。

植被现存量代表了某一时期植被总的生物量 (包括了枯落物、绿色部分以及地下生物量), 这些量直接可代表植被碳库的多少。8 月底 9 月初监测的地上生物现存量 (绿色及枯落物)、地下现存生物量在 11 a 内的动态变化情况见图 5。可以看到, 植被现存量明显高于净初级生产量, 11 a 平均为 $3\,422.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中地上 (包括地上枯落物量) 和地下现存量分别为 $411.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $3\,011.85 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。而其现存量的地下地上比高达 7.327, 比

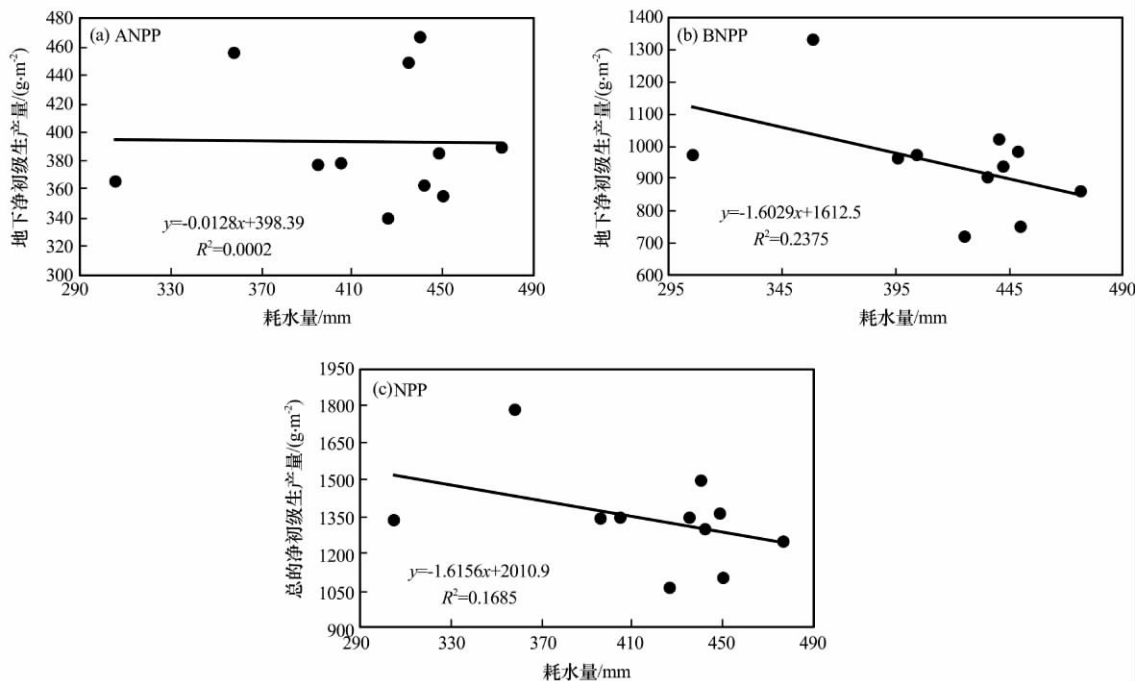


图 3 2001—2011 年植被地上 (a)、地下 (b)、总的 (c) 净初级生产量与耗水量关系
Fig. 3 Correlations of ANPP, BNPP and NPP with water consumption from 2001 to 2011

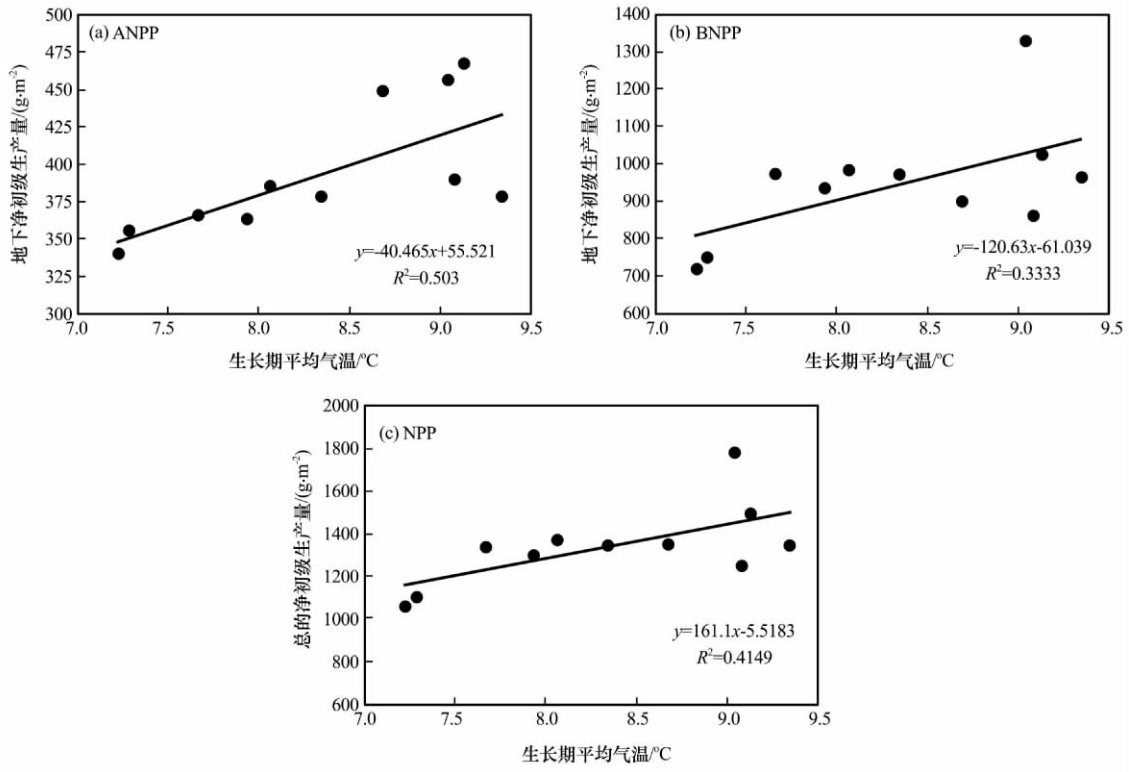


图 4 2001—2011 年植被地上(a)、地下(b)、总的(c)净初级生产量与生长期平均气温关系
 Fig. 4 Correlations of ANPP(a), BNPP(b) and NPP(c) with average air temperature in the growing period from 2001 to 2011

净初级生产比高 5.323。这些说明植被现存量巨大，特别是地下部分占有很高的比例，也证实植被碳库归还土壤碳量能力亦很大。

分析发现，现存量(地上、地下、枯落物总和)与植被生长期耗水量仅只是弱的正相关关系(图 6a)，这种关系也证实，与净初级生产量相比(图 3)，在高寒草甸地区植被现存量高低受蒸散量的影响显得更低，而与生育期的平均气温达显著性检验水平(图 6b, $P < 0.05$)。表明在高寒草甸地区水分条件对植被库的碳含量变化影响不大，而温度则影

响植被的碳储量的年际分配。
 2.2 NPP 的耗水利用率状况

尽管以上分析表明，在海北高寒草甸地区水分条件可满足植被生长发育的需要，而温度条件成为重要的影响因素。但是，植被在生长过程中的不同时期对水分的需求有所不同。我们曾分析发现^[19]，可将植物生长期的耗水过程可分 5 月、6—7 月、8—9 月 3 个阶段：即：植物缓慢生长耗水较低期、植物强度生长耗水旺盛期、植物生长渐止耗水降低期。3 个阶段中 5 月水分条件一定程度上影响到植物的初期营养生长但不甚显著。6—7 月，日平均气温稳定通过 $\geq 5^\circ\text{C}$ ，植物进入强度生长阶段，该期的温度和水分均成为植物生长和生物量提高的影响因素，水分是影响植被地上生物量提高的关键因素。8 月以后，温度缓慢下降，受低温环境影响，植物开始枯黄，蒸腾明显降低，该期水分条件是植物生长的非限制因素。从整个生长期来看，植被耗水量与 ANPP 并非有显著的关系，而与 BNPP 呈现较弱的负相关关系。而这种关系表现在水分利用率上。利用式(4)分别计算 ANPP、BNPP 和 NPP 的耗水利用率发现(图 7)，其水分利用率多年平均分

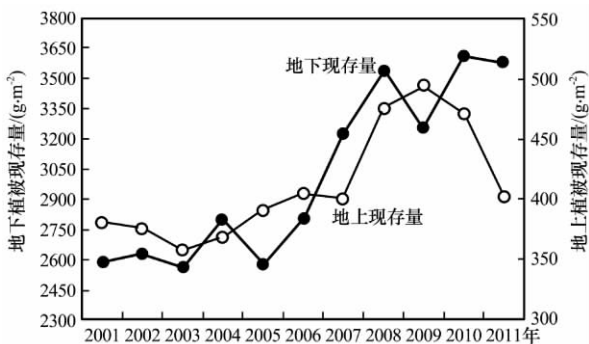


图 5 2001—2011 年 8 月底植被现存生物量年际动态
 Fig. 5 Variations of the standing crop biomass at the end of August from 2001 to 2011

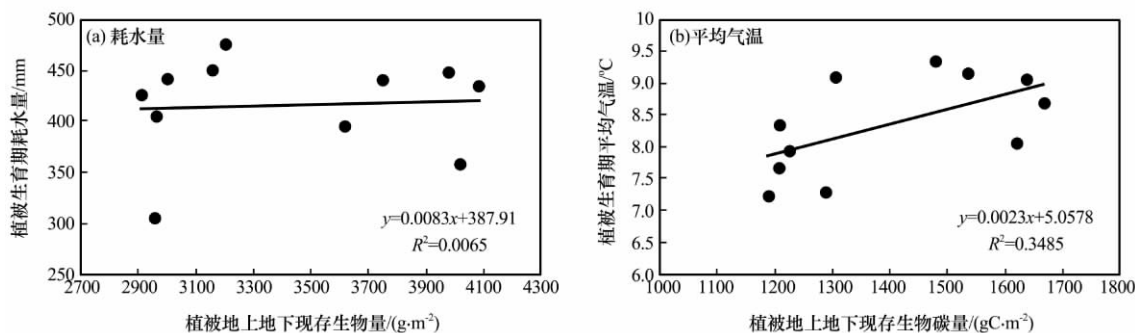


图 6 2001—2011 年植被地上、地下总的现存生物量与生育期耗水量(a)和平均气温(b)的关系

Fig. 6 Correlations of total standing biomass with water consumption (a) and average air temperature (b) from 2001 to 2011

别为 $0.958 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $2.326 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $3.284 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，最高年份分别可达 $1.274 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ (2008 年)、 $3.710 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ (2008 年)、 $4.381 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ (2001 年)，最低年份分别为 $0.790 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ (2004 年)、 $1.664 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ (2004 年)、 $2.454 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ (2001 年)，最高年份比最低年份分别高出 38%、55% 和 44%。

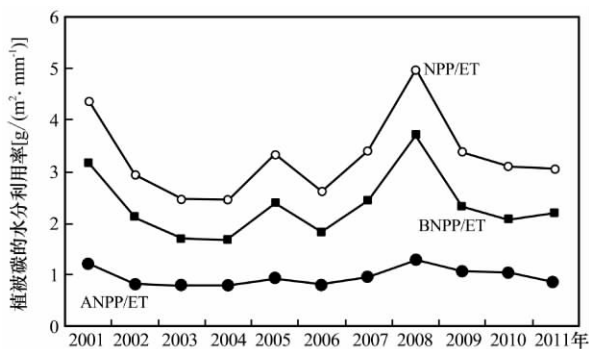


图 7 2001—2011 年植被水分利用率年际变化

注: ANPP/ET、BNPP/ET 和 NPP/ET 分别为植被地上、地下和总的净初级生产量的耗水利用率

Fig. 7 Variations of water use efficiency from 2001 to 2011

3 结论与结语

对于环境要素影响植被碳库储量及水分利用率研究可见诸多报道^[3-4, 20-24]。这些报道中因受区域环境条件限制,得出植被生物(碳)量有所不同,不仅其生物碳量与水分和温度之间的关系具有很大的差异性,其地下地上比也有很大的不同。青藏高原高寒草甸由于植被类型是长期在高海拔、低气温环境条件下的特殊植被类型,虽然地上与地下部分碳量受环境因素的影响略有差异,但不论是植被净初

级生产碳量还是现存碳量,总体来讲与水分条件关系不甚明显,而与温度具有很好的相关性。

统计 2001—2011 年高寒矮嵩草草甸植被生长季蒸散量发现,不同年份植被耗水量差异较大,11 a 平均来看,海北高寒矮嵩草草甸植物生长期植被耗水量平均为 416.3 mm,与同期降水量(415.2 mm)相仿,而且耗水量占同期降水量的 90% 以上。

海北高寒矮嵩草草甸 11 a 观测表明,ANPP、BNPP 和 NPP 平均分别为 $393.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $945.26 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1338.33 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其 BNPP 与 ANPP 的比值 11 a 平均为 2.404。统计发现 ANPP、BNPP 和 NPP 与同期植被耗水量之间的关系相关性很差,但与同期平均气温具有显著的正相关关系。由于植被耗水量与同期降水量具有显著的相关性,表明高寒草甸植被耗水量可满足植物生长的基本需求,相反,植被 NPP 的提高受热量条件影响明显。从植被的现存量来看,在 9 月包括地上生物量、地上枯落物、地下现存生物量其 11 a 平均为 $3422.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,其中地上(包括地上枯落物)和地下现存量分别为 $411.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $3011.85 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。而其现存量的地下地上比高达 7.327,比净初级生产量比高 5.323。说明植被地下现存碳量巨大,而且占有很高的比例,证实植被碳库归还土壤碳量能力巨大。

计算 ANPP、BNPP 和 NPP 耗水利用率发现,多年平均分别为 $0.958 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $2.326 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $3.284 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。比孙洪仁等^[20]对紫花苜蓿地上部分水分利用率($8 \sim 12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)基本相近稍偏低明显;比卢玲等^[4]对整个中国西部地区地上部分植被水分利用率单位平均值 $0.32 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 偏高 0.638;与卢玲等^[4]对研究中国西部地区青藏高原地上部分植被水

分利用率时指出的高、中和低覆盖度草地水分利用率的峰值分别为 $0.66 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $0.47 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $0.28 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 还是偏高。本实验是在植被盖度很高, 植被基本未退化高寒草甸进行, 而且土壤湿度与盖度之间存在一定的显著关系^[25]。由此看来, 本文计算得到的海北高寒草甸植被地上生物量的水分有效率年均值 $0.958 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 是可信的。

参考文献 (References):

- [1] Cui Xueming. Agricultural Meteorology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [崔学明. 农业气象学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.]
- [2] Liu Changming, Wang Huixiao. Water Transfer Processes of Soil-Plant-Atmosphere Continuum Interface and Water Saving Control[M]. Beijing: Science Press, 1999. [刘昌明, 王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [3] Wang Huixiao, Liu Changming. Advances in crop water use efficiency research[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 99-104. [王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99-104.]
- [4] Lu Ling, Li Xin, Huang Chunlin, et al. Analysis of the spatio-temporal characteristics of water use efficiency of vegetation in west China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(5): 777-784. [卢玲, 李新, 黄春林, 等. 中国西部植被水分利用效率的时空特征分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 777-784.]
- [5] Li Lin, Zhu Xide, Wang Qingchun, et al. Mapping and analyses of permafrost change in the Qinghai Plateau using GIS [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 320-328. [李林, 朱西德, 汪青春, 等. 青海高原冻土退化的若干事实揭示[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 320-328.]
- [6] Chang Guogang, Li Lin, Zhu Xide, et al. Changes and influencing factors of surface water resources in the source region of the Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(3): 312-320. [常国刚, 李林, 朱西德, 等. 黄河源区地表水资源变化及其影响因子[J]. 地理学报, 2007, 62(3): 312-320.]
- [7] Li Yuanshou, Wang Genxu, Zhao Lin, et al. Response of soil moisture in the permafrost active layer to the change of alpine meadow coverage on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 157-165. [李元寿, 王根绪, 赵林, 等. 青藏高原多年冻土活动层土壤水分对高寒草甸覆盖变化的响应[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 157-165.]
- [8] Chen Shengyun, Zhao Lin, Qin Dahe, et al. A preliminary study of the relationships between alpine grassland biomass and environmental factors in the permafrost regions of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 405-413. [陈生云, 赵林, 秦大河, 等. 青藏高原多年冻土区高寒草地生物量与环境因子关系的初步分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 405-413.]
- [9] Li Lin, Wang Zhenyu, Xu Weixin, et al. Response of growth of typical plateau meadow on Tibetan Plateau to climate change [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1006-1013. [李林, 王振宇, 徐维新, 等. 青藏高原典型高寒草甸植被生长发育对气候和冻土环境变化的响应[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1006-1013.]
- [10] Li Yingnian, Cao Guangmin, Bao Xinkui. Analysis on water consumption and water consumption rule of alpine meadow in its growing period[J]. Agricultural Meteorology, 1996, 17(1): 41-43. [李英年, 曹广民, 鲍新奎. 高寒草甸植被生育期耗水量和耗水规律的分析[J]. 中国农业气象, 1996, 17(1): 41-43.]
- [11] Qi Peitong, Gu Song, Tang Yanhong, et al. Comparison of three methods for measurement of evapotranspiration in an alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 202-211. [戚培同, 古松, 唐艳鸿, 等. 三种方法测定高寒草甸生态系统蒸散比较[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 202-211.]
- [12] Liu Anhua, Li Yingnian, Zhang Fawei, et al. Study on the soil water dynamics of *Kobresia humilis* meadow in growing season[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(10): 125-130. [刘安花, 李英年, 张法伟, 等. 高寒矮嵩草草甸植物生长季土壤水分动态变化规律[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 125-130.]
- [13] Liu Anhua, Li Yingnian, Xue Xiaojuan, et al. Study on evapotranspiration and crop coefficient of the alpine meadows in the Haibei area[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(1): 59-64. [刘安花, 李英年, 薛晓娟, 等. 高寒草甸蒸散量及作物系数的研究[J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 59-64.]
- [14] Hu Zhongmin, Yu Guirui, Wang Qiufeng, et al. Ecosystem level water use efficiency: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1498-1507. [胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 生态系统水分利用效率研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507.]
- [15] Li Yingnian, Zhao Xinquan, Cao Guangmin, et al. Analyses on climates and vegetation productivity background at Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(4): 558-567. [李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 558-567.]
- [16] Le Yanzhou, Zuo Kecheng, Zhang Jinxia, et al. Soil type and basic characteristics at Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station [C]//Alpine Meadow Ecosystem, Vol. 1. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1982: 19-33. [乐炎舟, 左克成, 张金霞, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站的土壤类型及其基本特点[C]//高寒草甸生态系统(第一集). 兰州: 甘肃人民出版社, 1982: 19-33.]
- [17] Wang Qiji, Wang Wenying, Deng Zifa. The dynamics of biomass and the allocation of energy in alpine *Kobresia* meadow communities, Haibei region of Qinghai province [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1998, 22(3): 222-230. [王启基, 王文颖, 邓自发. 青海海北地区高山嵩草草甸植物群落生物量动态及能量分配[J]. 植物生态学报, 1998, 22(3): 222-230.]
- [18] Li Yingnian. Analysis of the relationship between underground biomass and meteorological factors in alpine meadow and its turnover value[J]. Agricultural Meteorology, 1998, 19(1): 36-38, 42. [李英年. 高寒草甸植物地下生物量与气象条件的关系及周转值分析[J]. 中国农业气象, 1998, 19(1): 36-38, 42.]
- [19] Li Hongqin, Li Yingnian, Zhang Fawei, et al. Water con-

- sumption and influence of the meteorological factors on the vegetation biomass accumulation in alpine meadow[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, **27**; in press. [李红琴, 李英年, 张法伟, 等. 高寒草甸植被耗水量及生物量积累与气象因子的关系[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, **27**; 待刊.]
- [20] Sun Hongren, Liu Guorong, Zhang Yingjun, *et al.* Water requirement, water consumption, water requirement rate, water consumption rate and water use efficiency of alfalfa[J]. *Practical Science*, 2005, **22**(12): 24–30. [孙洪仁, 刘国荣, 张英俊, 等. 紫花苜蓿的需水量、耗水量、需水强度、耗水强度和水分利用效率研究[J]. *草业科学*, 2005, **22**(12): 24–30.]
- [21] Jiang Gaoming, Dong Ming. A comparative study on photosynthesis and water use efficiency between clonal and non-clonal plant species along the Northeast China Transect (NECT)[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2000, **42**(8): 855–863. [蒋高明, 董鸣. 沿中国东北样带(NECT)分布的若干克隆植物与非克隆植物光合速率与水分利用效率的比较[J]. *植物学报*, 2000, **42**(8): 855–863.]
- [22] Chen Shiping, Bai Yongfei, Han Xingguo. Variations in composition and water use efficiency of plant functional groups based on their water ecological groups in the Xilin River basin [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, **45**(10): 1251–1260. [陈世莘, 白永飞, 韩兴国. 内蒙古锡林河流域植物功能群组成及其水分利用效率的变化——依水分生态类群划分[J]. *植物学报*, 2003, **45**(10): 1251–1260.]
- [23] Zhao W Z, Niu Z R, Chang X L, *et al.* Water consumption in artificial desert oasis based on net primary productivity[J]. *Science China Earth Science*, 2010, **53**(9): 1358–1364. [赵文智, 牛最荣, 常学礼, 等. 基于净初级生产力的荒漠人工绿洲耗水研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, **40**(10): 1431–1438.]
- [24] Su Min, Wang Yanrong, Zhao Wenli, *et al.* Comparative research of soil moisture utilization of four kinds of groundcover plants under long-term drought[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, **34**(2): 65–70. [苏敏, 王艳荣, 赵文丽, 等. 持续干旱下四种地被植物对土壤水分利用的比较研究[J]. *中国草地学报*, 2012, **34**(2): 65–70.]
- [25] Li Yingnian, Zhang Fawei, Liu Anhua, *et al.* Responses of soil temperature and humidity to changes of vegetation coverage in alpine *Kobresia tibetica* meadow[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, **27**(4): 265–268, 272. [李英年, 张法伟, 刘安花, 等. 矮嵩草草甸土壤温湿度对植被盖度变化的响应[J]. *中国农业气象*, 2006, **27**(4): 265–268, 272.]

Interannual Variations of Production and Water Use Efficiency of the Vegetation in Alpine Meadow

LI Hong-qin^{1,2}, LI Ying-nian^{1,2}, ZHANG Fa-wei^{1,2}, LIU Xiao-qin^{1,3},
WU Qi-hua^{1,3}, MAO Shao-juan^{1,3}

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining Qinghai 810001, China;

2. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Chinese Academy of Sciences, Xining

Qinghai 810001, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Statistical analysis on the water consumption, standing biomass, net primary production, water use efficiency and their correlations with the vegetation in Haibei alpine meadow from 2001 to 2011 showed that the water consumption from May to September was 416.30 mm, the aboveground net primary production (ANPP) was 393.07 g · m⁻², the belowground net primary production (BNPP) was 945.26 g · m⁻² and the total net primary production (NPP) was 1 338.33 g · m⁻², and the ratio of BNPP to ANPP was 2.404, the standing crop biomass at the end of August reached 3 422.92 g · m⁻², of which the ANPP and BNPP was 411.07 g · m⁻² and 3 011.85 g · m⁻², respectively, with the ratio of BNPP to ANPP of

7.327. This demonstrates that the current vegetation had huge standing stock and great ability to return the soil carbon. NPP had a poor correlation with the water consumption but had a significantly positive correlation with the air temperature averaged from May to September, indicating that water condition in the alpine meadow could meet the demand for the plant growth, and the synchronous air temperature was the principal factor to improve the NPP. Water consumption averaged over the 11 years shows that the water use efficiency for BNPP, ANPP and NPP was 0.958 g · m⁻² mm⁻¹, 2.326 g · m⁻² mm⁻¹ and 3.284 g · m⁻² mm⁻¹, respectively, indicating that the vegetation in alpine meadow had a higher water use efficiency.

Key words: alpine meadow; water consumption; interannual variation; standing biomass; net primary production; water use efficiency