

# 三江源区人工草地蒸散量与气候因子的相关分析

冯承彬<sup>1,2</sup>, 张耀生<sup>1\*</sup>, 赵新全<sup>1</sup>, 赵双喜<sup>1,2</sup>, 米兆荣<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所高原生物适应与进化重点实验室, 青海西宁 810001; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100001)

**摘要** 该研究以小型自动气象站观测资料为基础, 采用 FAO Penman-Monteith 方法估算三江源区人工草地参考作物蒸散量, 并结合 FAO-56 推荐的综合作物系数值进行草地实际蒸散量的计算, 分析了三江源区人工草地实际蒸散量的变化及其与气象因子的关系。结果表明, 草地实际蒸散量的季节变化为单峰曲线, 夏季日蒸散量明显大于冬季, 在 8 月中旬达到年度最高值。蒸散与空气温度、太阳辐射和相对湿度均显著相关, 但与风速的相关性不显著。各气象因子对人工草地蒸散量影响的大小顺序为: 空气温度 ( $T$ ) > 太阳辐射 ( $R_a$ ) > 空气相对湿度 ( $RH$ ) > 风速 ( $u_2$ )。

**关键词** 三江源; 人工草地; 蒸散量; 气候因子

**中图分类号** S11<sup>+</sup>9 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2008)33-14365-03

## Correlation Analysis between the Evapotranspiration Quantity and Climatic Factors of Artificial Grassland in Three River Sources Areas

FENG Cheng-bin et al (Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810001)

**Abstract** Based on observation data from the mini-type automatic weather station, the evapotranspiration quantity of reference crops from artificial grassland in three river sources areas was estimated by the method of FAO Penman-Monteith. The actual evapotranspiration quantity of grassland was calculated according to the synthetic crop coefficients referenced by FAO-56, and the change of the actual evapotranspiration quantity of artificial grassland in three river sources areas as well as the relationship between the evapotranspiration quantity and climatic factors were studied. The results suggested that the seasonal change of actual evapotranspiration quantity in grassland was expressed in a single peak curve with the peak in the middle August, and daily transpiration quantity in summer was significantly larger than that in winter. The evapotranspiration was significantly correlated with air temperature, solar radiation and relative humidity, but not significantly correlated with wind speed. Effects of climatic factors on the evapotranspiration quantity of artificial grassland were ordered as follow: air temperature ( $T$ ) > solar radiation ( $R_a$ ) > relative humidity ( $RH$ ) > wind speed ( $u_2$ ).

**Key words** Three river sources; Artificial grassland; Evapotranspiration; Climatic factor

三江源地处青藏高原腹地, 是我国乃至亚洲重要的水源涵养地。近年来由于气候暖干化及人为因素的影响, 草地退化日趋严重, 为此, 国家建立了全国面积最大的三江源自然保护区。有关三江源区环境因素对草地生态系统的影响已有一些研究<sup>[1-3]</sup>, 但关于该区草地蒸散量的报道尚少。草地蒸散量研究是揭示草地初级生产力形成机制和动态变化规律的一个重要方面, 得到了科学工作者的日益关注, 相关报道既有许多大尺度的研究<sup>[4-5]</sup>, 也有许多关于蒸散日变化的研究<sup>[6-8]</sup>。在植被选择上, 国内外对农作物和林地研究较多, 并有了较成熟的方法<sup>[9-13]</sup>。牧草的蒸散与大多数作物的蒸散特点具有共性<sup>[14]</sup>, 许多学者对不同区域草地的蒸散进行了研究<sup>[15-18]</sup>。该试验以三江源区人工建植的多年生草地为研究对象, 分析了草地实际蒸散量的变化动态及其与气候因子的关系, 旨在为高寒地区人工草地的建植与植被修复提供理论依据。

## 1 试验地概况与研究方法

**1.1 试验地概况** 试验地位于黄河上游的同德县, 地处海南、黄南、果洛三州交界处, 是三江源自然保护区的试验区, 属于大陆高原性气候。据《三江源自然保护区生态环境》资料, 年均气温为 -3.0~6.1, 最热月 7 月的平均气温为 11.9, 最冷月 1 月的平均气温为 -13.2; 年降水量为 230~540 mm, 各地降水差异悬殊, 雨量分布呈南多北少、东多西少

的趋势, 降水多集中在 5~9 月, 占年总降水量的 85% 以上, 季节分布极不均匀; 年蒸发量为 1 466 mm; 年日照时数 2 550~2 760 h。

试验地是植被退化后种植第 6 年的披碱草人工草地, 面积约为 53.3 hm<sup>2</sup>, 从第 1 年起草地一直严格禁牧。草地群落以垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 为主要优势种群, 随人工种植年限的延长, 小嵩草 (*Kobresia pygmaea*)、草地早熟禾 (*Poa pratensis*)、二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*) 等种群在草地群落中呈逐年增加趋势。群落总盖度为 20%~60%。试验区土壤为栗钙土。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 数据观测。**在试验区架设小型自动气象站, 进行空气温度 ( $T$ )、空气相对湿度 ( $RH$ )、风速 ( $u_2$ ) 和太阳辐射 ( $R_a$ ) 等数据的观测。采用 2007 年 4 月 25 日~12 月 31 日的观测数据。

**1.2.2 蒸散量的计算。**草地实际蒸散量计算采用传统的参考作物蒸散量-作物系数法。其公式为:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

式中:  $ET_c$  为实际蒸散量 (mm/d),  $K_c$  为作物系数,  $ET_o$  为参考作物蒸散量 (mm/d)。参考作物蒸散量 ( $ET_o$ ) 由标准化、统一化后的 FAO Penman-Monteith 公式计算得到, 作物系数 ( $K_c$ ) 采用 FAO-56 的推荐值并经调整得出<sup>[19]</sup>, 具体方法如“1.2.3”和“1.2.4”所述。

**1.2.3 参考作物蒸散量  $ET_o$  的确定。**为解决 Penman-Monteith 模式中空气动力学阻力和植被冠层表面阻力取值比较困难的问题, 1992 年 Smith 在总结试验的基础上提出了计算蒸散量的 P-M 简化公式。该公式全面考虑影响田间水分散失的大气因素和作物因素, 将能量平衡、空气动力学参数和表面参数结合在一起, 可应用于世界各个地区, 估值精度

**基金项目** 国家科技支撑计划项目“高寒草地退化生态系统综合整治技术研究”(2006BAC01A02); 中国科学院西部行动计划项目“三江源区退化生态系统受损与修复机制及可持续管理”(KZCX2XB20601)。

**作者简介** 冯承彬(1983-), 男, 山东平阴人, 硕士研究生, 研究方向: 生态学。\*通讯作者。

**收稿日期** 2008-09-10

较高且具有良好的可比性,其公式形式为:

$$ET_o = \frac{0.408 (R_n - G) + \frac{C_n \times u_2 \times (e_s - e_a)}{T + 273}}{1 + C_d \times u_2}$$

式中:  $ET_o$  为参考作物蒸散量 (mm/d); 为饱和水汽压曲线对温度的斜率 (kPa/°C);  $R_n$  为净辐射 [MJ / (m<sup>2</sup> d)];  $G$  为地热通量 [MJ / (m<sup>2</sup> d)]; 为干湿表常数 (kPa/°C);  $C_n$  和  $C_d$  均是以 1 d 为步长的彭曼公式设置常数 ( $C_n = 900$ ,  $C_d = 0.34$ );  $e_s$ 、 $e_a$  分别为饱和水汽压和实际水汽压 (kPa);  $T$  为日平均温度 (°C);  $u_2$  为 2 m 高处的风速 (m/s)。

**1.2.4 综合作物系数  $K_c$  的计算。**参考 FAO-56 中对牧草生育期的划分,根据该研究区的霜期和气温等实际资料,确定 2007 年牧草生育期如下: 2007 年 4 月 25 日~5 月 31 日为初始生长期; 6 月 1 日~8 月 31 日为生长中期; 9 月 1 日~10 月 31 日为生长后期; 11 月 1 日~12 月 31 日为非生长期。FAO-56 推荐的牧草初始生长期、生长中期和生长后期的作物系数分别为:  $K_{c(i)} = 0.40$ ,  $K_{c(m)} = 1.05$ ,  $K_{c(e)} = 0.85$ <sup>[20]</sup>。对于非生长期,牧草地为干草覆盖,由于土壤冻结等原因,相应的作物系数比  $K_{c(i)}$  值略小<sup>[19]</sup>。由于该区气候条件与标准条件有一定差异,对生长中期和后期作物系数  $K_{c(m)}$  和  $K_{c(e)}$  调整如下<sup>[19]</sup>:

$$K_c = K_{c(推荐)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)](h/3)^{0.3}$$

式中,  $RH_{min}$  为每日最小空气相对湿度的平均值 (%), 20%  $RH_{min} < 80\%$ ;  $u_2$  为 2 m 高处的风速 (m/s),  $1 \text{ m/s} < u_2 < 6 \text{ m/s}$ ;  $h$  为计算时段内的平均株高 (m),  $0.1 \text{ m} < h < 10.0 \text{ m}$ 。

## 2 结果与分析

**2.1 实际蒸散量的季节变化特征** 图 1 为三江源人工草地整个生长季实际蒸散量与降水量的动态变化,表现为夏季较大,冬季较小,其中 6~8 月 3 个月的蒸散量占到了生长季总蒸散量的 55%。蒸散量在 8 月中旬达到年度最高值,为 2.41 mm/d,这主要与空气温度、湿度、风速和太阳辐射有关。在牧草生长季,由于空气温度的回升和降水的增加,土壤含水量逐渐增加,在温度、水分适宜条件下,植被生长迅速,蒸散过程在 6 月上旬出现了 1 次小时段的峰值,7 月份气温持续升高,降水也逐步增加,蒸散量出现了不同程度的高位波动,并在 8 月中旬达到年度最大值。此时是生长季蒸散量的分界,从 8 月下旬直至生长末期,只是在 9 月中下旬出现了小幅度的反弹波动,但由于降水的减少、气温降低以及牧草长势的衰弱,此时可供蒸散的水分已经很少,草地蒸散量逐渐减少并趋于稳定。

### 2.2 实际蒸散量与环境因子的关系

**2.2.1 实际蒸散量与空气温度的关系。**蒸散状况受多种因素的影响,其中有关空气温度对蒸散量的影响,很早就引起了研究者的重视。大量研究表明,随着空气温度的升高,水分运动加快,蒸散速率增加<sup>[21]</sup>。在三江源区,由于空气温度的日变化和季节变化较大,对蒸散的影响更为显著。

由图 2 可知,草地实际蒸散量与空气温度之间呈现正相关关系,相关系数为 0.889 7,并在 0.01 水平上达到显著,这与刘晨峰等<sup>[8]</sup>的研究一致。观测期内空气温度最大值出现在 8 月上旬,为 16.04 °C,最小值出现在 12 月下旬,为 -7.25

°C,平均值为 7.03 °C。随空气温度的升高,草地实际蒸散量呈增加趋势,这可能是由于空气温度的增加,加快了水分运动,加剧了水分交换。需要指出的是,对许多平原地区的长期研究表明空气温度与蒸散相关度不高<sup>[22]</sup>。

**2.2.2 实际蒸散量与空气相对湿度的关系。**蒸散的大小与近地面层的空气相对湿度显著相关。长期观测中相对湿度对蒸散的影响有正有负<sup>[22]</sup>,在一些蒸散日变化的研究中二者负相关<sup>[6]</sup>。当空气中相对湿度大的时候,植物蒸发到空气中的水分就会减少;反之,空气相对湿度越小,蒸散就越快、越多。在连续晴热高温时,空气较为干燥,而太阳辐射强度大,土壤蒸发和植物蒸腾加大,容易发生干旱。

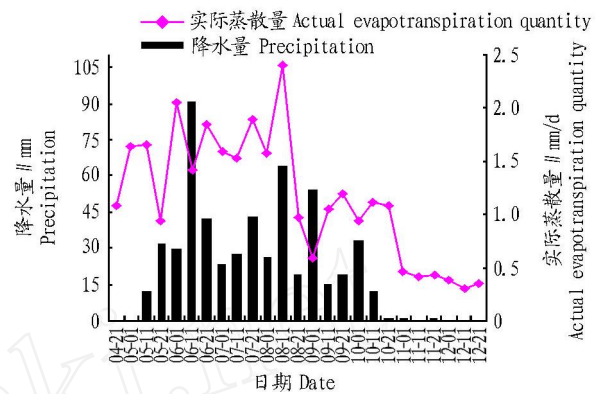


图 1 人工草地实际蒸散量与降水量的季节动态变化

Fig. 1 Dynamic variation of actual evapotranspiration and precipitation of tame grassland

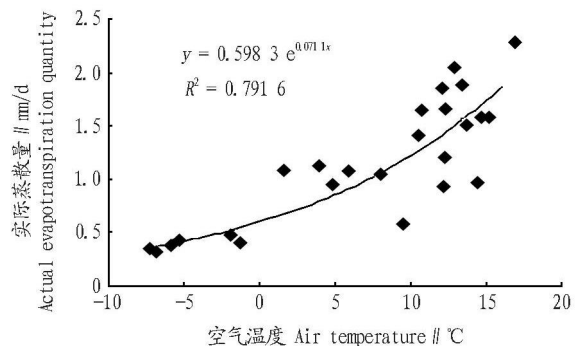


图 2 人工草地空气温度与实际蒸散量的关系

Fig. 2 The relationship between air temperature and actual evapotranspiration of tame grassland

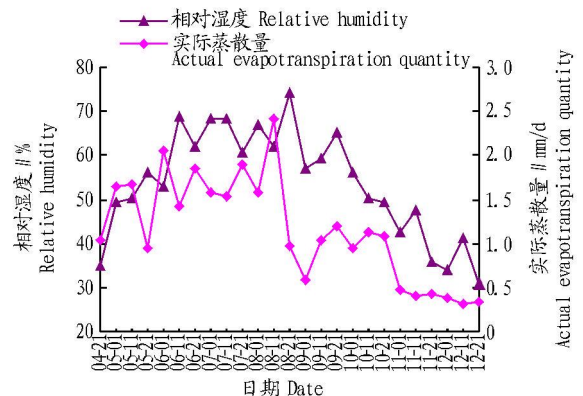


图 3 人工草地空气相对湿度的动态变化

Fig. 3 Dynamic variation of air RH of tame grassland

由图 3 可知,草地空气相对湿度的动态变化表现为:夏

季相对湿度较大,秋季次之,冬季较小。对实际蒸散量和空气相对湿度进行相关性分析得出,相关系数为 0.589 0 ( $P=0.002$ )。夏季前后空气相对湿度变化幅度明显比其他季节小,而实际蒸散量在此前后急剧变化。比如:6 月上旬前后,空气相对湿度变化缓慢,但实际蒸散量的变化剧烈,先升后降;9 月上旬前后,空气相对湿度变化不大,实际蒸散量仍剧烈变化,先降后升。由此可知,在一定程度上,空气相对湿度的变化与实际蒸散量的变化是相反的。

**2.2.3 实际蒸散量与风速的关系。**风具有输送水热和二氧化碳的作用,是影响蒸散的重要因素之一,所以在计算蒸散量时,风速是必须考虑的因素之一。特别是在干旱半干旱地区,因平均风速较大,对蒸散的影响尤为显著。

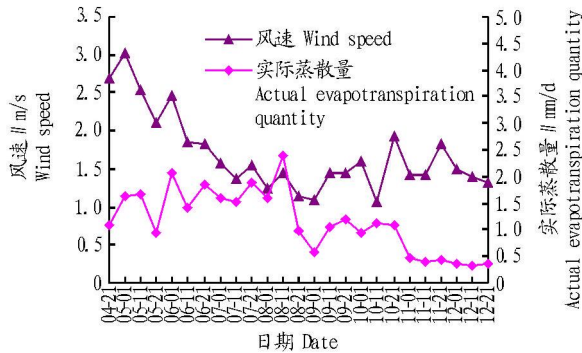


图 4 人工草地风速的动态变化

Fig. 4 Dynamic variation of wind speed of tame grassland

由图 4 可知,草地风速的动态变化表现为:春季风速较大,夏季相对较小,之后又变大。对风速与实际蒸散量的相关分析表明,风速与实际蒸散量呈正相关关系 ( $r=0.335 0$ ,  $P=0.102$ ),即风速增大,蒸散量也相应增大,这与康绍忠等<sup>[22]</sup>和司建华等<sup>[7]</sup>的研究结论基本一致,但该研究中二者的相关关系不显著。需要注意的是,正常情况下,三江源地区下午有风,上午、中午微风或无风,这一点不同于农田,故该研究中风速与蒸散相关关系不显著。

**2.2.4 实际蒸散量与太阳净辐射的关系。**当太阳辐射存在时,产生的能量可能被植物吸收或以热能的形式散发掉,对植物体和空气的温度影响极大,温度上升时水分的蒸散也随之上升。

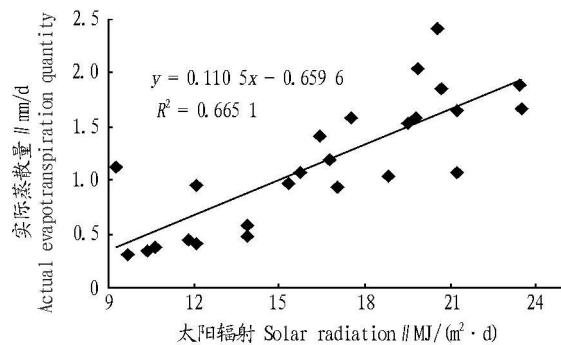


图 5 人工草地太阳辐射与实际蒸散量的关系

Fig. 5 The relationship between solar radiation and actual evapotranspiration of tame grassland

由图 5 可知,草地太阳辐射与草地实际蒸散量之间有很好的正相关关系,相关系数为 0.823 3,并在 0.01 水平上达到显著。太阳辐射动态变化为:夏季较大,春季次之,冬季较

小。太阳辐射作为水汽交换的能量源泉,其大部分能量用于土壤蒸发和植物蒸腾,因而蒸散的变化趋势与净辐射的变化基本一致<sup>[7]</sup>。在 7、8 月份,太阳辐射强度较大,对地面增温效果明显,地表水汽交换强烈,蒸散强度较大。

对实际蒸散量与气候单因子进行线性和曲线估计拟合,择其相关系数大者为最佳拟合式,可以发现,气象因子对蒸散影响的大小顺序为空气温度 ( $T$ ,  $r=0.889 7$ ) > 太阳辐射 ( $R_a$ ,  $r=0.823 3$ ) > 空气相对湿度 ( $RH$ ,  $r=0.589 0$ ) > 风速 ( $u_2$ ,  $r=0.335 0$ )。

以各个气象因子为自变量,以实际蒸散量为因变量,用 SPSS 统计软件进行多元线性逐步回归分析<sup>[7]</sup>,得到实际蒸散量与环境因子的综合关系式:  $ET_c = 0.166 0 + 0.049 9 R_a + 0.046 4 T + 0.026 0 u_2 - 0.003 7 RH$ 。

### 3 结论

(1) 三江源区人工草地的实际蒸散量 ( $ET_c$ ) 季节动态变化为:夏季实际蒸散量较大,冬季较小,在 8 月中旬达到年度最大值,平均为 2.41 mm/d。

(2) 该研究分析了一个生长季内各个气象因子与草地实际蒸散量之间的关系。其中,空气温度与实际蒸散量极显著正相关,即随温度的上升蒸散量呈显著增加趋势;太阳辐射是蒸散的驱动力,与蒸散的变化具有较高的同步性;空气相对湿度变化与蒸散的变化在一定程度上是相反的;风速增大,实际蒸散量也相应增加,但其影响未达到显著水平。

(3) 对三江源区人工草地一个生长季内实际蒸散量及其影响因子的相关分析表明,环境因子对蒸散影响的大小顺序为:空气温度 ( $T$ ) > 太阳辐射 ( $R_a$ ) > 空气相对湿度 ( $RH$ ) > 风速 ( $u_2$ )。

### 参考文献

- [1] 刘纪远,徐新良,邵全琴,等. 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征[J]. 地理学报, 2008, 63(4): 364-376.
- [2] 赵亮,古松,周华坤,等. 青海省三江源区人工草地生态系统  $CO_2$  通量[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 544-554.
- [3] 王长庭,曹广民,王启兰,等. 三江源地区不同建植期人工草地植被特征及其与土壤特征的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2426-2431.
- [4] 高歌,陈德亮,任国玉,等. 1956~2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 378-387.
- [5] 程玉菲,王根绪,席海洋,等. 近 35a 来黑河干流中游平原区陆面蒸散发的变化研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 406-412.
- [6] 刘安能,周新国,孟兆江,等. 不同土壤水分条件下麦地蒸散日变化规律研究[J]. 节水灌溉, 2005(3): 01-03.
- [7] 司建华,冯起,张小由,等. 极端干旱条件下柽柳种群蒸散量的日变化研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 380-385.
- [8] 刘晨峰,张志强,查同刚,等. 涡度相关法研究土壤水分状况对沙地杨树人工林生态系统能量分配和蒸散日变化的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2549-2557.
- [9] RANAN G, KATERI I N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under mediterranean climate: a review[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13: 125-153.
- [10] 杨兴国,杨启国,柯晓新,等. 旱作春小麦蒸散量测算方法的比较[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 651-656.
- [11] 窦军霞,张一平,于贵瑞,等. 西双版纳热带季节雨林水热通量[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 2999-3109.
- [12] 程根伟,陈桂蓉. 贡嘎山暗针叶林区森林蒸散发特征与模拟[J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 617-621.
- [13] 许晓鸿,戴全厚,孙硕,等. 黑松幼苗造林水分蒸散人工模拟试验研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 82-84.
- [14] 赵炳祥,陈佐忠,胡林,等. 草坪蒸散研究进展[J]. 生态学报, 2003, 23(1): 148-157.
- [15] 宋炳煜. 草原区不同植物群落蒸发蒸腾的研究[J]. 植物生态学报, 1995, 19(4): 319-328.

(下转第 14502 页)

$\mu\text{mol/L}$  Cu 处理相反,在 1 000  $\mu\text{mol/L}$  Cu 供应时,细胞壁结合态 Cu 分配率 (D4) 最高,其次是蛋白结合态 Cu (D3),二者合计达 65%。因此,Cu 浓度对各组分 Cu 分配率的影响情况是:高铜培养使丙酮和缓冲液可溶态 Cu (D1)、丙酮不可溶而缓冲液可溶态 Cu (D2) 分配率降低,而细胞壁结合态 Cu (D4) 和蛋白质结合态 Cu (D3) 分配率增加。

对细胞壁结合态 Cu 做进一步分析发现,60%左右的 Cu 是与纤维素或果胶等相结合的,能够被纤维素酶或离析酶所

溶解(表 5)。用 0.05  $\text{mol/L}$  HCl 水解后,80%~90%的 Cu 被从细胞壁上溶解下来,高于用酶解离的 Cu,这与 HCl 的浸提能力较强有关,这部分 Cu 的差额可能也是与纤维素等细胞壁物质结合的。组分 D3 主要是细胞壁结合蛋白或膜结合蛋白,由于提取程序的缘故,这部分所含有的 Cu 也可能包含少量本属于组分 D4 的 Cu,即 Cu 在组分 D4 中的分配率实际上高于表 4 中所示的 39%和 41%。

表 5 1 000  $\mu\text{mol/L}$   $\text{Cu}^{2+}$  处理下紫鸭跖草根细胞壁不同组分中  $\text{Cu}^{2+}$  含量

提取剂 Extraction agent	处理时间 d Treatment time	$\text{Cu}^{2+}$ 含量 $\text{Cu}^{2+}$ content		回收率 % Recovery rate
		可溶性成分 Soluble component	不可溶性成分 Insoluble component	
纤维素酶 Cellulase	30	261(63)	146(37)	92
	60	278(62)	170(38)	99
离析酶 Macerozyme	30	226(58)	164(42)	95
	60	267(59)	185(41)	98
空白 Blank	30	44(11)	354(89)	97
	60	40(9)	410(91)	99
HCl	30	353(88)	48(12)	97
	60	380(85)	67(15)	101

### 3 结论

研究结果表明,在叶片和根系中,细胞壁均是 Cu 在紫鸭跖草中分布的主要位点之一。叶绿体是重要的功能细胞器,其所含 Cu 占叶片全 Cu 的比例较大,是叶片中除细胞壁外的另一重要 Cu 分布位点。在高铜处理或处理时间延长的情况下,根细胞中 Cu 向细胞壁的分配增加,向质体中的分配减少,而叶细胞中 Cu 向叶绿体中的分配增多,向细胞壁的分配减少。运用化学试剂顺序提取法和酶解法研究了 Cu 在紫鸭跖草根和叶片中的赋存形态,结果显示,叶片中 Cu 主要与氨基酸和小分子色素、蛋白质、多糖等结合,而根中 Cu 则主要与纤维素、膜结合蛋白等细胞壁物质相结合。Cu 在细胞内的分配和存在形态可能是紫鸭跖草超积累 Cu 的重要机理之一。

### 参考文献

- [1] 孙建云,沈振国.铜胁迫下甘蓝幼苗生长和铜吸收的基因型差异[J].西北植物学报,2005,25(10):2003-2009.
- [2] YANG J R,BAO Z P,ZHANG S Q. Distribution and chemical binding forms of Cd,Pb in plant [J]. Chi Enviro Sci,1993,13(4):263-268.
- [3] KUPPER H,ZHAO F J,MC GATH S P. Cellula compartmentation of zinc in leaves of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant Physiol,1999,119:305-311.
- [4] MEHARG A A. The role of the plasmalemma in metal tolerance in angiosperms [J]. Physiol Plant,1993,88:191-198.
- [5] HARRISON S I,LEPP N W,PHIPPS D A. Uptake of copper by excised roots. Copper desorption from free space [J]. Z Pflanzenernahr Bodenkd,1979,94:27-34.

- [6] ALLAN D L,JARRILL W M. Proton and copper adsorption to maize and soybean root cell walls[J]. Plant Physiol,1989,89:823-832.
- [7] 王友保,张莉,沈章军,等.铜尾矿区土壤与植物中重金属形态分析[J].应用生态学报,2005,16(12):2418-2422.
- [8] 黄长干,陈斌,邱业先.铜盐毒害对紫鸭跖草养分吸收和生长的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(1):190-194.
- [9] ALLEN S E. Chemical analysis of Ecological Materials[M]. 2nd edn. Oxford: Blackwell Science Publishers,1989.
- [10] MORRISON R S,BROOKS R R,REEVES R D,et al. The diverse chemical forms of heavy metals in tissue extract of some metallophytes from Shaba province,Zaire[J]. Phytoehent,1981,20:455-458.
- [11] IWASAKI K,SAKURAI K,TAKAHASHI E. Copper binding in the root cell walls of Italian ryegrass and red clover[J]. Soil Sci ant Nutr,1990,36(3):431-439.
- [12] ERNST W H O,VERKLEIJ J A C,SHAT H. Metal tolerance in plants[J]. Acta Bot Neerl,1992,41(3):229-248.
- [13] HENRIDUES F S. Effects of copper deficiency on the photosynthetic apparatus of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). [J]. Plant Physiol,1989,135:453-458.
- [14] LASTRA O,CHUECA A,GONZLE C,et al. Ecobre como nutrientes de la planta Anales Edafol[J]. Agrobiol,1987,46:1005-1020.
- [15] LETIA L,NOBILI M D,CESCO S. Analysis of intercellular cadmium forms in roots and leaves of bush bean[J]. J Plant Nutr,1996,19(3/4):527-533.
- [16] HUANG C G,FUL LIANG Y,et al. Studies on distribution and chemical characteristics of copper in cells of *Setcreasea purpurea* Boom. [J]. Agricultural Science & Technology,2008,9(5):81-87.
- [17] CLARKSON D T,HANSON J B. The mineral nutrition of higher plants[J]. Annual Rev Plant Physiol,1980,31:239-298.
- [18] WAGNER G J,KROTZ R M. Perspectives on Cd and Zn accumulation,accommodation and tolerance in plant cells:The roll of Cd-binding peptide versus other mechanisms[J]. Molecular Biology and Chemistry (Metal ion homeostasis),1989,98:325-336.
- [19] 周云龙.植物生物学[M].北京:高等教育出版社,1999:11.

(上接第 14367 页)

- [16] 程积民.黄土丘陵半干旱区几种牧草蒸腾作用的研究[J].干旱区研究,1989(2):62-65.
- [17] 王根绪,沈永平,钱鞠,等.高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究[J].冰川冻土,2003,25(6):653-659.
- [18] 宋克超,康尔泗,金博文,等.黑河流域山区植被带草地蒸散发试验研究[J].冰川冻土,2004,26(3):349-356.

- [19] ALLEN R G,PEREIRA L S,RAES D,et al. FAO irrigation and drainage paper no. 56,crop evapotranspiration[M]. Rome,Italy:FAO,1998.
- [20] 吴锦奎,丁永建,沈永平,等.黑河中游地区湿草地蒸散量试验研究[J].冰川冻土,2005,27(4):582-590.
- [21] 张富仓,张一平,张君常.温度对土壤水分保持影响的研究[J].土壤学报,1997,34(2):160-169.
- [22] 曹红霞,粟晓玲,康绍忠,等.陕西关中地区参考作物蒸发蒸腾量变化及原因[J].农业工程学报,2007,23(11):8-16.