

草原群落蒸发蒸腾的研究*

宋炳煜

(内蒙古大学, 呼和浩特 010021)

摘要 在中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站, 采用“土柱称重法”对典型草原群落蒸发蒸腾进行实验观测, 主要研究结果如下: (1) 土壤因子的影响: (a) 在通常情况下, 草原群落蒸发、蒸腾及蒸散均随土壤水分增加而增大; 当土壤水分过多时, 群落蒸腾由于植物受涝而降低。(b) 在低土壤含水量条件下, 群落蒸发随土壤粘粒含量增加呈线性降低; 在高土壤含水量条件下, 群落蒸发随土壤粘粒含量增加而升高。(c) 不同土壤含水量的群落蒸发, 均随土壤坚实度增大升高, 并先后达最高值。土壤含水量愈低, 蒸发达最高值愈滞后。(2) 放牧因素的影响: 群落蒸腾与牧压呈线性负相关; 群落蒸发与牧压呈线性正相关。群落生物量随牧压增大而降低是导致群落蒸发和蒸腾与牧压呈正、负相关的主要原因。(3) 退化群落及其恢复群落的蒸发蒸腾: 群落退化导致群落蒸发升高, 蒸腾降低; 相应的群落恢复导致群落蒸发降低, 蒸腾升高。在一定程度上, 群落退化及其恢复演替虽然能明显改变群落 T/E 值, 但却不会引起群落蒸散值的明显变化。(4) 草原沙地、羊草草原和河漫滩草甸是本地差异明显的三种群落。草甸蒸腾最大 (9.2 mm/d), 比另两种群落高 2~3 倍; 草甸蒸发最小 (0.4 mm/d), 约为沙地的 $1/4$, 草原的 $1/8$ 。(5) 羊草草原在本区分布广, 大针茅草原是本区半干旱地带性代表。由于这两种群落主要有关背景值的不同, 羊草群落蒸散值 ($4.4 \sim 5.0 \text{ mm/d}$) 明显高于大针茅群落 ($3.5 \sim 3.8 \text{ mm/d}$), 而且羊草群落的 T/E 值 (~ 2) 也明显大于大针茅 (~ 2)。在生长季节中, 羊草草原蒸散随气温升高而升高, 在盛夏达最高值, 然后随气温降低而降低。然而由于降雨变化的影响, 羊草草原蒸发蒸腾的季节变化时而出现较大幅度的波动。(5) 根据 1989 年实测的降水和羊草群落蒸发蒸腾的季节变化, 分析羊草群落的水分收支, 可以看到实验区羊草草原的水分收支是大致平衡的。

关键词 草原群落 蒸发蒸腾 地面因子 水分收支平衡

1 前言

在草原生态系统中, 水分循环是通过大气降水与植被蒸发蒸腾相互转化实现的。Philip 等^[1]在 1966 年提出的“SPAC”, 即土壤-植物-大气连续系统概念, 从理论上阐明了植物在水分循环和水分平衡中的作用。已有报道表明, 植被的改变, 如森林垦为农田, 首先引起蒸发蒸腾降低, 土壤盐分淋溶加剧, 地表水质变坏, 甚至酿成土地盐碱化和水源恶化等严重的环境问题^[2]。那么, 草原植被的改变, 如草原农垦、过牧草场退化以及草原沙化等, 会对草原植被蒸发蒸腾产生怎样的影响呢? 草原生态系统的水分循环和水分平衡又会发生怎样的变化呢?

近年来, 作者在中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站 (简称“定位站”, $43^{\circ}39'N$, $116^{\circ}43'E$), 对典型草原群落蒸发蒸腾进行研究, 力图弄清草原植被的改变与

1997-07-18 收到

• 本工作在中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站完成

群落蒸发蒸腾的关系, 探讨草原生态系统水分循环和水分平衡的规律, 为草地资源可持续利用提供基础依据。

2 实验区的自然条件

实验区位于 $43^{\circ}04' \sim 44^{\circ}08'N$, $116^{\circ}04' \sim 117^{\circ}07'E$, 属于典型草原栗钙土亚区, 地势东南高 (海拔 1400~1500 m) 西北低 (1000~1100 m)。北半部为丘陵塔拉 (高原) 相间的具波状起伏的高原地形。南半部有多级玄武岩台地, 还有分散的小型火山锥和浑圆的丘陵与平展的宽谷。在这两个地貌单元之间有锡林河从东南流向西北。河流北岸有东西连绵的沙带 (小腾格里沙地的一部分)。

实验区气候属半干旱草原气候, 冬半年寒冷干燥, 夏半年受季风气流影响较为温和湿润。年平均温度 $-0.4^{\circ}C$, 最冷的 1 月份平均气温 $-22.3^{\circ}C$, 最热的 7 月平均 $18.8^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 的积温为 $1597.9^{\circ}C$, 持续 112 天, 无霜期约为 100 天。草原植物生长期约 150 天。全年降水量 350 mm 左右, 随海拔升高而增加, 达 400 mm 以上。降水年变化显著, 变动于 180~500 mm 之间, 且集中分布于 7~9 月, 占全年降水的 70% 左右。这种水热同期的气候显然有利于植物生长发育, 但春旱和夏秋降水多变化, 又对植物生长发育造成一定威胁。冬季降雪, 稳定降雪日数 90 天左右。积雪增加土壤底墒, 利于植物返青; 但积雪过厚或过薄常给放牧造成灾害。此外, 春季多大风, 平均风速 $3.9 m/s$ 。大风引起风蚀, 植被遭破坏, 易造成沙化。

实验区地带性土壤为栗钙土, 分为典型栗钙土和暗栗钙土, 分别与大针茅草原和羊草草原相对应。在海拔 1250 m 以上的山地草甸, 分布有山地黑钙土。此外, 隐域性沙地的栗土型沙土、河漫滩的草甸土和沼泽土等。

特定的自然地理条件和气候、土壤特点形成了以草原为主兼有森林、灌丛、草甸和沼泽等类型的植被。其中草原可分为典型草原和山地草甸草原两类。典型草原又分为羊草小禾草草原、大针茅变蒿草原、克氏针茅冷蒿草原和羊茅线叶菊草原及其沙生变体等 5 类^[3]。

从上述分析可见, 由于地理位置、地貌条件、土壤和气候特点以及植被群落类型等自然条件, 实验区发育形成了一个典型草原生态系统类型, 为本项研究提供了一个很好的基础背景。

3 草原群落蒸发蒸腾的测定方法

在水分循环和水分平衡诸要素中, 陆地蒸散的测定是最困难的; 在热量平衡诸要素中, 显热流和潜热流 (蒸散) 的精密分割是相当困难的。因此, 蒸散测定方法的选用是非常重要的^[4]。陆地蒸散包括土壤表面蒸发和植物群落蒸腾。由于草原群落类型多, 群落组成复杂以及植物生长发育过程变化, 使草原蒸发蒸腾的测定更加困难。

微气象学方法、水量平衡法已被许多研究者采用, 在一定条件下, 能较好地估测植物群落蒸散量, 但难以区分开群落蒸发与群落蒸腾^[5]。气体交换室方法可以直接测定群落蒸散, 但由于气体交换室内的条件如辐射强度、温度和湿度等难以调控, 而往往得不

到较好的测定效果。大型蒸发渗漏仪也可以直接测得群落蒸散值,测量精度较高;但对于草原群落来说,由于草原群落类型多,群落结构复杂,种群格局不均匀,致使蒸发渗漏仪的应用也受到一定限制。气体交换室法和蒸发渗漏仪法都难以把群落蒸发与群落蒸腾分开。

作者在研究工作中,常采用“土柱称重法”^[6]。该方法所需的设备简单,可以分别测得草原群落蒸发和群落蒸腾。在“定位站”曾对离体叶片称重法、气体交换室法和土柱称重法进行过比较实验,结果表明土柱称重法的效果是比较好的。近些年来,继续采用土柱称重法,对不同类型草原的群落蒸发蒸腾及群落蒸发蒸腾季节动态进行监测,进一步证明应用土柱称重法测定草原群落蒸发蒸腾是可行的。

3 地面因子对草原群落蒸发蒸腾的影响

与气象因子(如来自空中的太阳辐射、大气温度和降水等)相对应,土壤因子、植被因子和人为活动等,可称为地面因子。值得重视的是,地面因子与空间因子相比较,在一定程度上,是可人为控制的。因此,研究地面因子对草原群落蒸发蒸腾的影响,将会进一步地认识草原生态系统水分循环和水分平衡的规律,为草原资源可持续利用提供有价值的理论依据。

3.1 土壤因子对蒸发蒸腾的影响

3.1.1 土壤质地

“定位站”北靠小腾格里沙地,南临锡林河,由北向南,自沙丘顶、沙丘底到河岸阶地,其土壤颗粒形成呈由粗到细的自然梯度。沿着这个梯度进行土柱取样,可分5个等级土壤质地。在5种土壤水分条件下,进行蒸发蒸腾测定,结果如图1所示。

图1中的5条线说明了在不同土壤水分条件下,土壤质地对群落蒸发蒸腾的影响。这5条线可以明显地分为两组:一组是低土壤水分的 E_4 和 E_6 ;一组是高土壤水分的 E_{13} 、 E_{15} 和 E_{20} 。在土壤含水量低($<6\%$)的条件下,群落蒸发随着土壤粘粒含量增加呈线性降低。因为在较干的土壤中,缺少毛管水,而以吸附水为主。粘粒越多,其表面积越大,吸附力也越大,从而导致群落蒸发随粘粒含量增加而降低。在土壤含水量高($>13\%$)的情况下,群落蒸发则随土壤粘粒含量增加而升高(E_{13} 、 E_{15} 和 E_{20})。然而,当土壤粘粒含量超过30.0%时,群落蒸发先后达到最高值;土壤含水量愈高,则达到最高值愈滞后。如果土壤粘粒含量再增加,则蒸发呈降低趋势。因为在含水量较高时,土壤水是以毛管水为主,粘粒增加会增强土壤毛细管作用。所以,在土壤粘粒较少时($<30.0\%$),群落蒸发随粘粒增加而升高。当土壤粘粒含量超过一定范围时($>30.0\%$),由于粘粒增加,土壤吸附能力(即吸水力)增大,从而抑制了土壤毛细管作用,故导致群落蒸发降低。

3.1.2 土壤紧实度

在进行草原土壤水分测定工作中,常会发现牧畜践踏严重的草场,其土壤水分低于邻近践踏较轻的草场。由此联想,可能是土壤紧实度不同而引起这种土壤水分的差异,进而还会影响草场群落蒸发蒸腾。

1992年8月,在“定位站”的退化草场实验样地,选择一些裸地小斑块,挖制原状

土柱, 然后将土柱调整为 4 种土壤含水量 (9%、11%、13% 和 15%)。待水分在土柱内渗透均匀后, 分别用松土 (2 cm、5 cm 和 10 cm 深)、手压、脚踩和木槌砸的方法造成不同土壤紧实度处理。经过土壤硬度计测定得知这些不同处理的土壤紧实度依次为 0.1、0.3、1.5、8.7 和 12.2 kg/cm^2 。实验结果见图 2 所示。

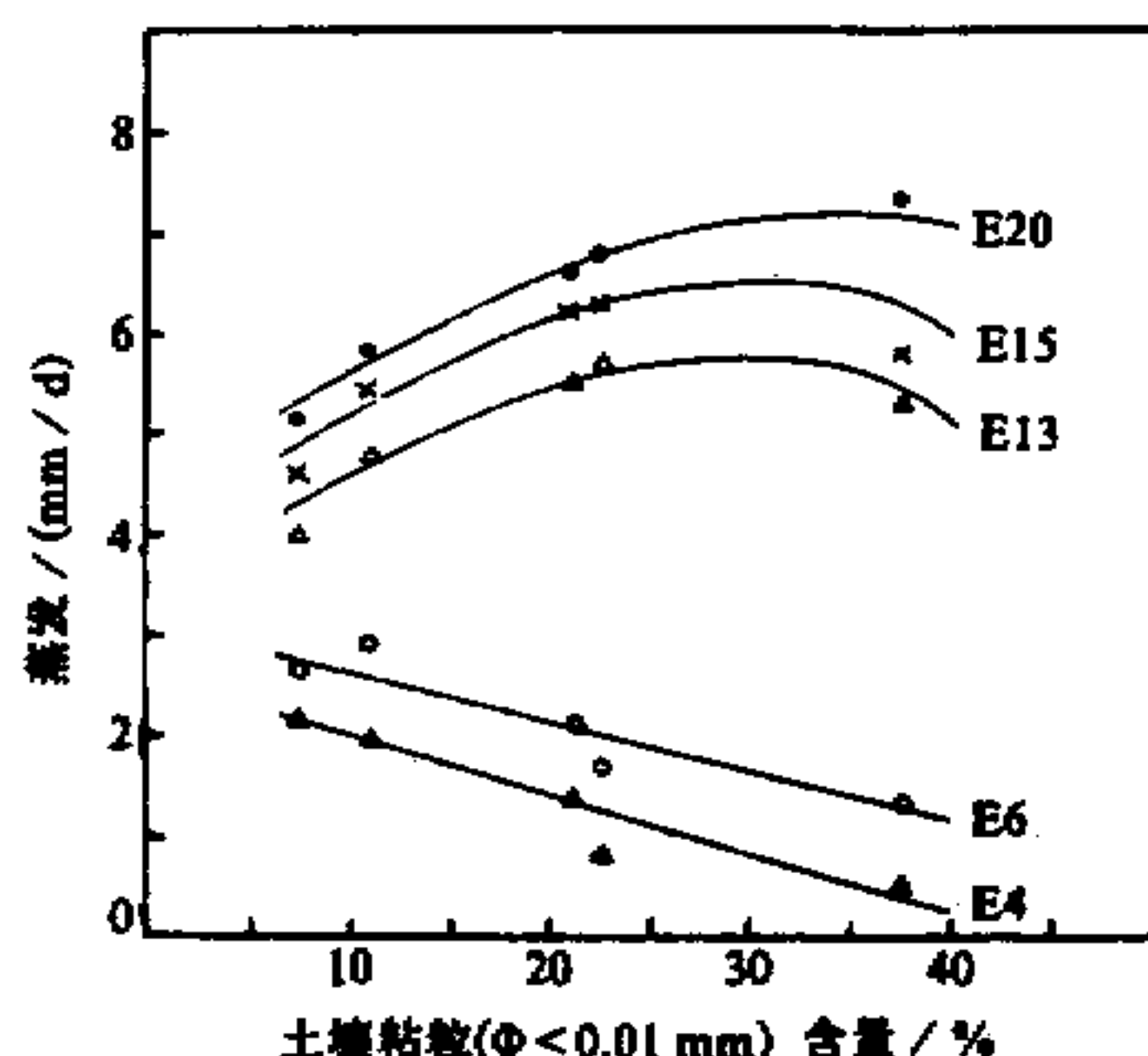


图 1 土壤粘粒含量对群落蒸发的影响
曲线 E_4 、 E_6 、 E_{13} 、 E_{15} 和 E_{20} 分别表示土壤含水量为 4%、6%、13%、15% 和 20% 的群落蒸发

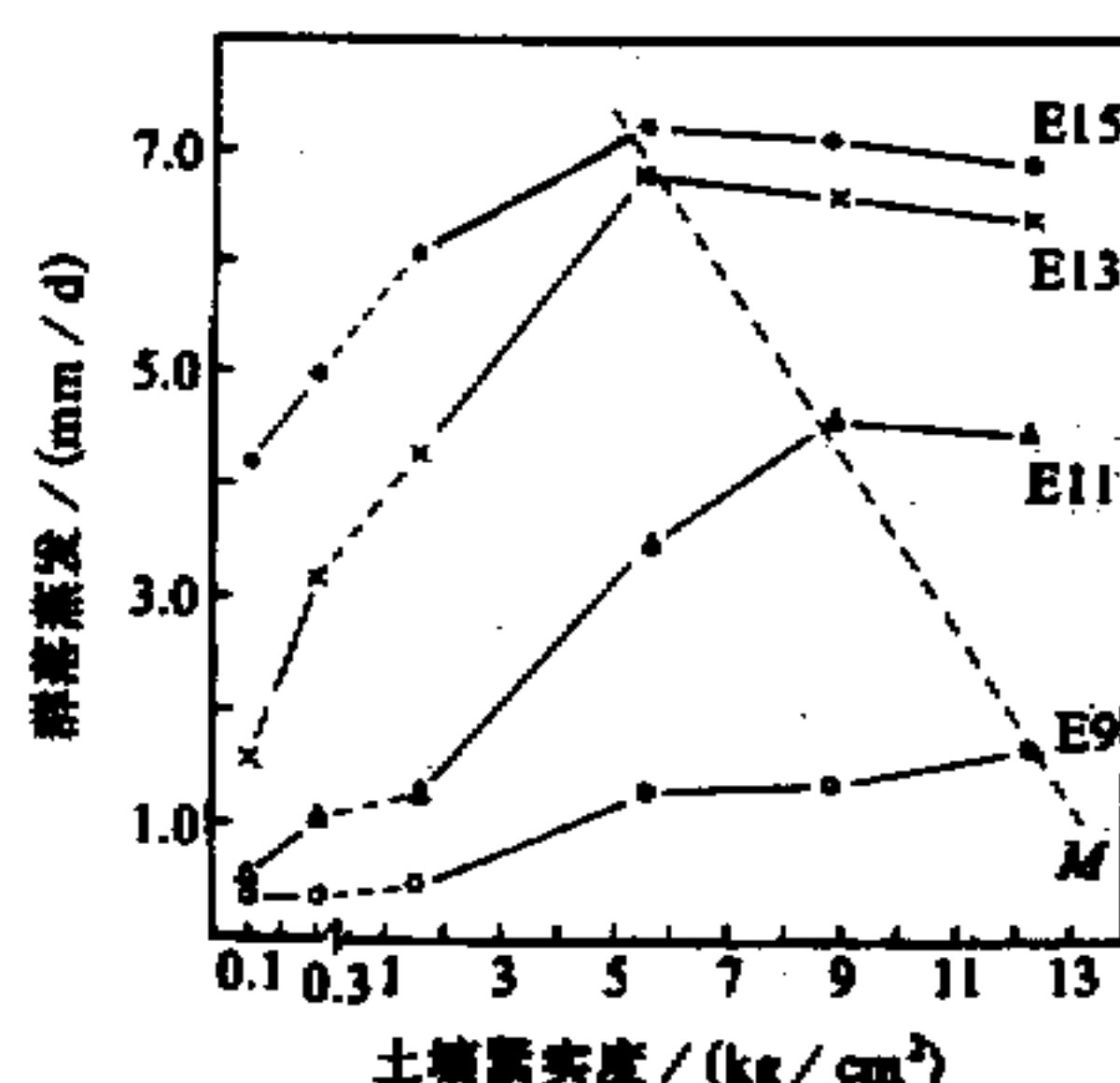


图 2 土壤紧实度对群落蒸散的影响
曲线 E_9 、 E_{11} 、 E_{13} 和 E_{15} 分别表示土壤含水量为 9%、11%、13% 和 15% 的群落蒸发

从图 2 可以明显地看出, 不论在哪一级土壤含水量水平上, 群落蒸发均随土壤紧实度增大而增高, 当土壤紧实度增大到 5.5 kg/cm^2 之后, 不同土壤含水量的蒸发先后达到最大值。在土壤含水量较高 (13% 和 15%) 时, 蒸发 (E_{13} 和 E_{15}) 最大, 即在土壤紧实度为 5.5 kg/cm^2 时达到最大值, 约为 7 mm/d。当土壤含水量减小到 11% 时, 蒸发 (E_{11}) 推迟到土壤紧实度为 8.7 kg/cm^2 时才达到最大值 (4.5 mm/d)。当土壤含水量继续减小到 9% 时, 蒸发 (E_9) 最大值进一步推迟到土壤紧实度超过 12.2 kg/cm^2 之后才可能出现。图 2 中 M 线直观地表示了这种趋势, 土壤含水量愈低, 蒸发达到最大值愈滞后。

另外, 从图 2 还可以看出, 在蒸发达到最大值之前, 不同土壤含水量的蒸发曲线斜率具明显差异, 土壤含水量越高, 其蒸发曲线斜率越大。这说明较湿的土壤蒸发受紧实度影响的效果大于较干的土壤蒸发所受的影响。

值得注意的是, 在土壤紧实度小于 0.3 kg/cm^2 范围内, 横座标的比例尺放大了 6 倍。这意味着, 对于疏松的土壤来说, 即使是土壤紧实度变化很小, 也会导致蒸发产生很大的变化。这里, 土壤紧实度仅减小 0.2 kg/cm^2 , 而蒸发的降低幅度达 1.6 mm/d。由此可见, 松土可以起到极好的保持土壤水分的作用。

3.1.3 土壤水分

图 1 和图 2 除了说明土壤质地和土壤紧实度对蒸发的影响之外, 还可以明显说明土壤水分对蒸发的影响。在图 1 中, E_4 和 E_6 曲线表明低土壤含水量 (4% 和 6%) 的蒸发仅为 0.5、2.5 mm/d; E_{13} 、 E_{15} 和 E_{20} 曲线表明, 当土壤含水量增加到 13%、15% 和 20% 时, 蒸发随之升高到 5.0、6.0、7.5 mm/d。在图 2 中同样可以看到, 随着土壤含

水量从 9% 升高到 11%，再到 15%，与之相应的蒸发线 E_9 、 E_{11} 和 E_{15} 的位置也节节提高，蒸发从 0.5 mm/d，升高到 6.0 mm/d，直到 7.0 mm/d。

1992 年 8 月，在“定位站”的羊草草原实验样地取样，然后分别将土柱的土壤水分调整为 6%、7%、13% 和 20% 四个组，进行群落蒸发蒸腾测定。每个土柱每次称量完，即补给当日蒸散掉的水量，以保持每个土柱的原含水量。实验结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出，在土壤含水量 < 13% 的范围内，群落蒸发蒸腾随土壤含水量增加而升高。当土壤含水量增加到 13% 时，群落蒸发蒸腾达到并保持在最高值水平上，无明显变化。如果土壤含水量再增加，群落蒸腾会由于植物受涝而降低。

另外，图 3 中蒸发曲线 E 和蒸腾曲线 T ，在低土壤含水量范围 (< 7%) 内，彼此接近或交叉，说明蒸腾与蒸发之比 $T/E \approx 1$ ；而在较高土壤含水量 (> 7%) 条件下，彼此分开，蒸发明显高于蒸腾，即 $T/E < 1$ 。应该指出的是，影响群落 T/E 值的因素是多方面的，除了气象因子之外，还有群落结构、群落生物量、土壤性质、放牧及其它人为活动干扰等。 T/E 值是草原群落水分生态的重要指标，它的变化能够反映植物群落活力状况。

3.2 放牧因素对草原群落蒸发蒸腾的影响

在草原生态系统的诸要素中，放牧对草原群落的影响是多方面的，不仅影响群落结构和生物量，还影响群落的物质循环和水分状况。图 4 表示在畜群放牧点附近的围栏内（多年禁牧）和围栏外（连年频牧）群落蒸发蒸腾的差异。

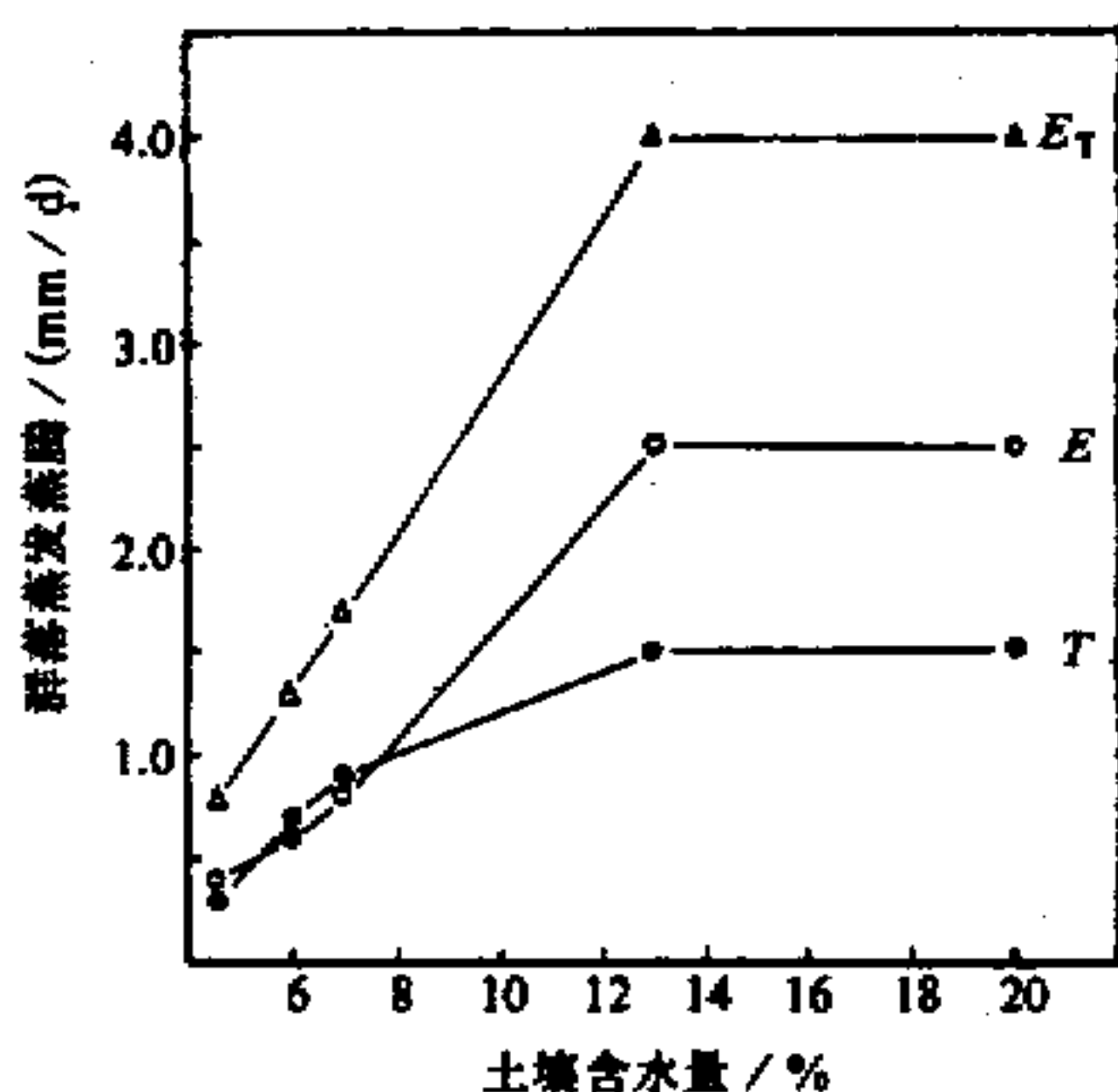


图 3 土壤含水量对草原群落蒸发蒸腾的影响
 E : 群落蒸发; T : 群落蒸腾; E_T : 群落蒸散

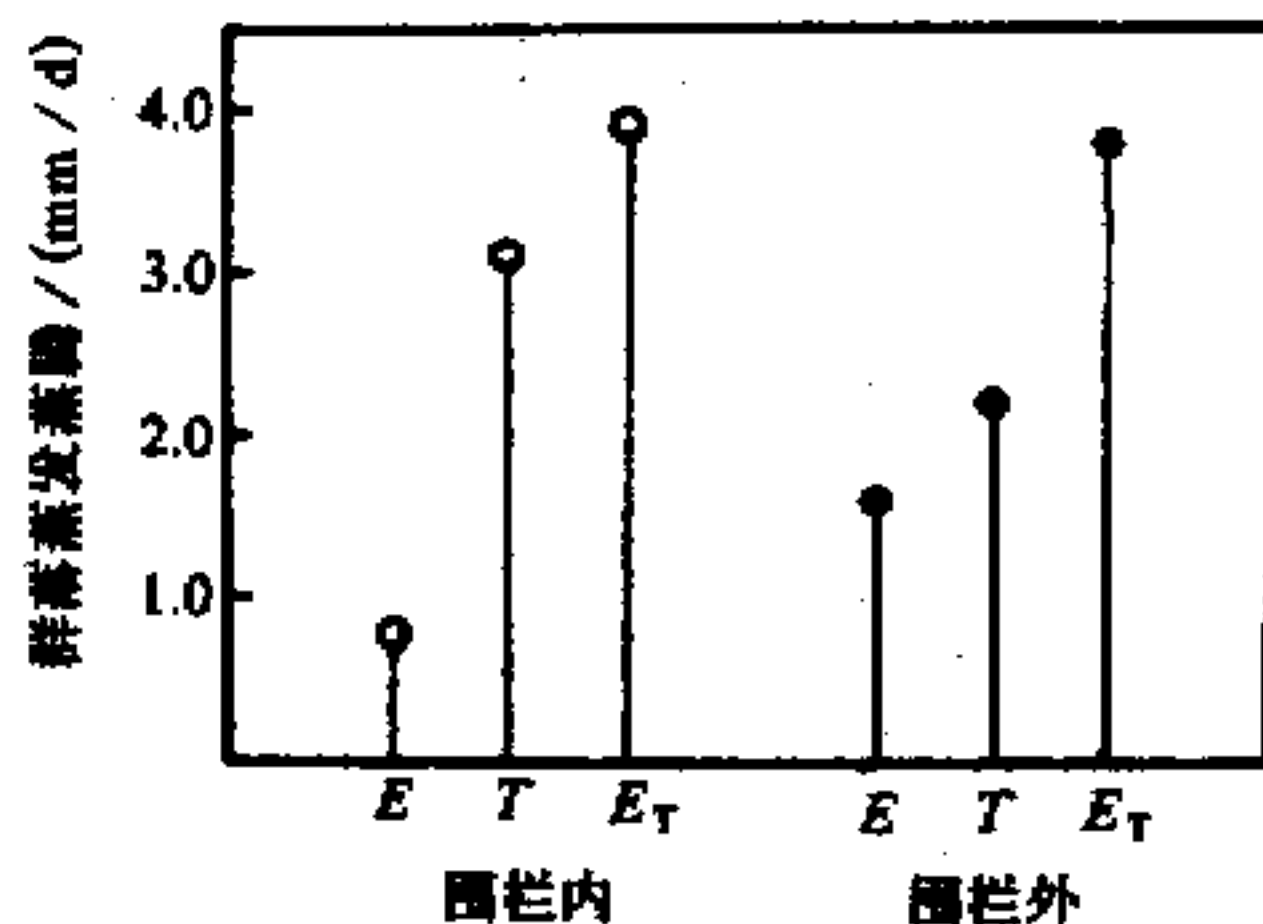


图 4 放牧与禁牧羊草群落蒸发蒸腾的比较
其余同图 3

从图 4 可以看出，围栏内外，即禁牧群落和频牧群落的蒸散大致相等。但两者的蒸发和蒸腾却差异明显，频牧群落蒸发为禁牧群落蒸发的 2 倍，而频牧群落蒸腾却远低于禁牧群落蒸腾。围栏外，由于频繁过度放牧导致群落生物量降低，群落蒸腾减小；群落盖度减小，群落蒸发明显增大。这说明，放牧会明显地改变群落 T/E 值。在一定的放牧强度条件下，群落蒸散虽然无明显变化，但群落蒸散的组分却发生明显变化，即群落蒸发明显增大，群落蒸腾相应减小。

1992 年 8 月在“定位站”放牧实验样地的轻度放牧区(4 只羊/hm²)、中度放牧区(12 只羊/hm²)、重度放牧区(20 只羊/hm²)和对照区(不放牧)进行群落蒸发蒸腾比较测定, 进一步探讨不同放牧强度对草原群落蒸发蒸腾的影响。实验结果如图 5 所示。

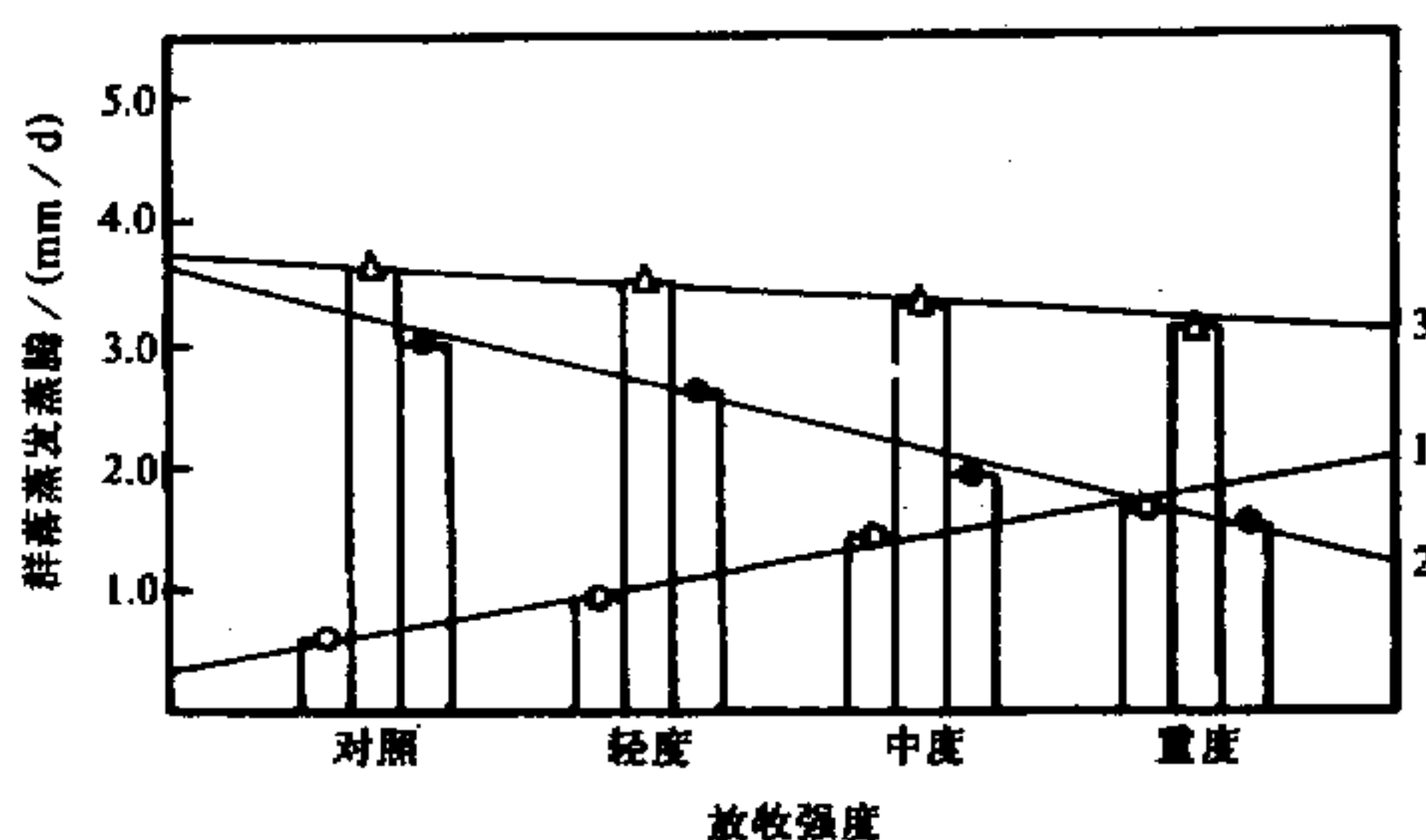


图 5 不同放牧强度对草原群落蒸发蒸腾的影响。1: 蒸发; 2: 蒸腾; 3: 蒸散

从图 5 可以看出, 随着放牧强度递增 (对照→轻度→中度→重度), 群落蒸腾递减 (3.2 mm/d→2.6 mm/d→1.9 mm/d→1.5 mm/d), 即群落蒸腾与放牧强度呈明显的线性负相关 ($r=0.9$); 相应的群落蒸发则随放牧强度增大而递增 (0.6 mm/d→0.9 mm/d→1.4 mm/d→1.6 mm/d), 呈明显的线性正相关 ($r=0.9$)。在表 1 中列出与本实验同步测得的不同放牧处理区的群落地上生物量。群落生物量随放牧强度增大而递减是引起蒸发和蒸腾与放牧强度呈线性正、负相关的主要原因。

值得指出的是, 本实验中放牧强度的大幅度改变并未引起群落蒸散的明显变化, 而是稳定在 3.4 ± 0.3 mm/d 的水平上, 但 T/E 值明显地不同。

表 1 不同放牧强度条件下的群落地上生物量

处 理	对照区	轻度放牧区	中度放牧区	重度放牧区
地上生物量/(g/m ²)	135.0±18.3	75.8±16.8	44.9±8.7	42.3±6.7

3.3 退化草原及其恢复群落的蒸发蒸腾

研究退化草原及其恢复群落的蒸发蒸腾, 实际上是探讨自然的和人为的综合因素对草原群落蒸发蒸腾的影响, 有助于揭示草原退化的机理, 为实现草原生态系统的良性循环提供科学依据。

位于锡林河南岸山丘北坡的洪积扇, 地势较平坦 (斜度 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$), 属于典型羊草草原。这里靠近居民点和放牧点, 草场退化严重, 以冷蒿 (*Artemisia Frigida*) 和星毛萎陵菜 (*Potentilla Acaulis*) 占明显优势的小叶锦鸡儿 (*Caragana Microphylla*) 斑块镶嵌群落。草层矮小稀疏, 群落盖度不足 20%, 地上生物量约 40 g/m²。1983 年春, “定位站”在这片严重退化的草场上建立了 26.6 hm² 的围栏封育样地, 即退化草场实验样地。经过 8 年的自然恢复演替, 围栏内呈现以羊草 (*Leymus Chinense*) 和大针茅 (*Stipa Grandis*) 占明显优势的羊草群落, 草层高约 40 cm, 群落盖度达 50%, 地上生物量达到 150 g/m² 以上。围栏内外的群落呈明显的对照: 围栏外, 严重退化的草原群落; 围

栏内, 恢复后的典型羊草群落。1991 年 5~9 月对退化草场实验样地围栏内外的群落蒸发蒸腾进行了整个生长季节的比较观测。实验结果如图 6 所示。

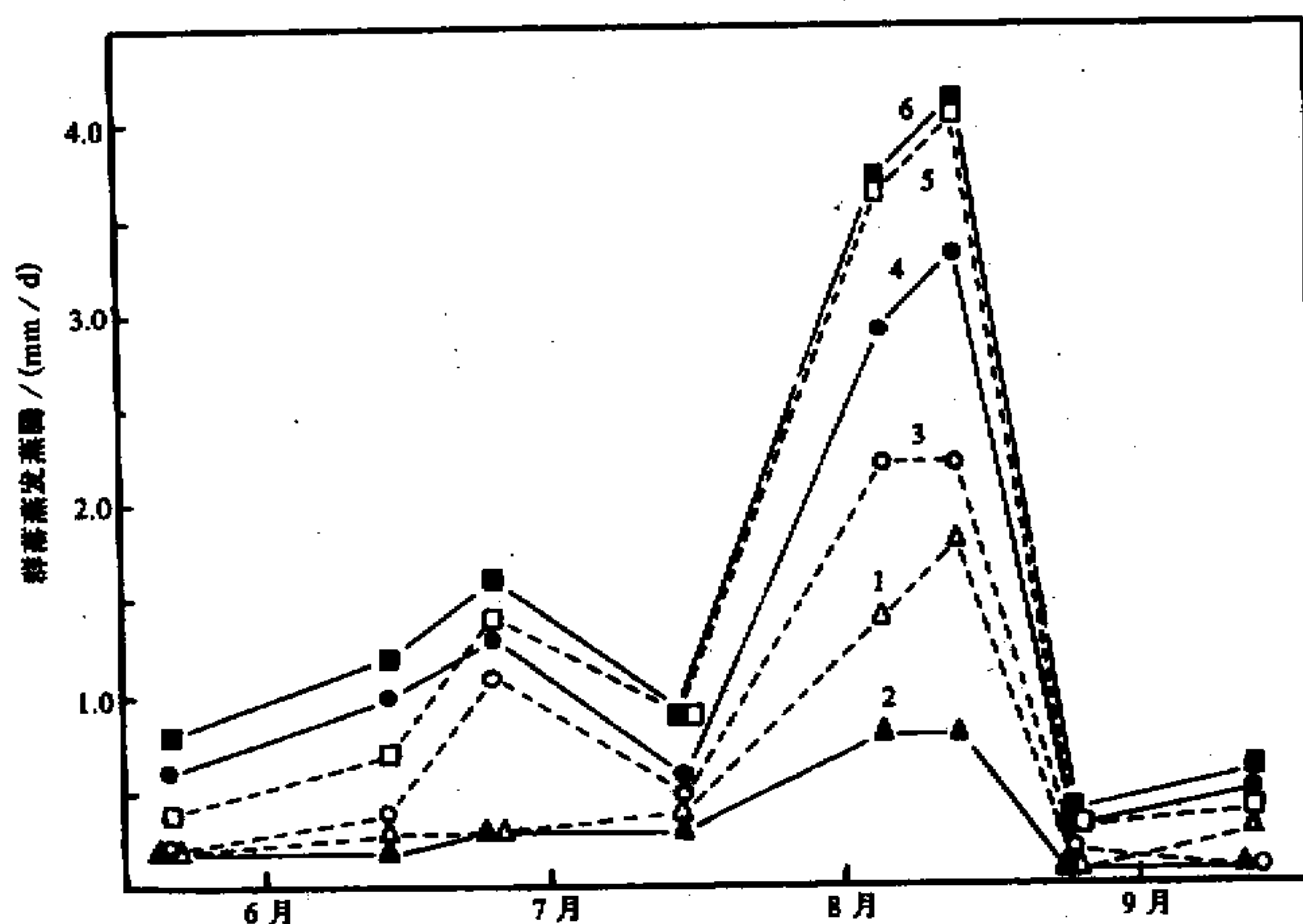


图 6 退化草原群落及其恢复群落的蒸发蒸腾

△、▲: 蒸发; ○、●: 蒸腾; □、■: 蒸散。空白表示退化群落, 全黑表示恢复群落

仔细比较图 6 中围栏内外的群落蒸发蒸腾, 可以发现: (1) 在生长季节的前半期 (5 月中旬~7 月中旬) 围栏内、外的群落蒸发近似相等, 而且数值很低 ($0.2 \sim 0.3 \text{ mm/d}$); 生长季节后半期 (7 月中旬~8 月底), 二者的群落蒸发均明显升高 ($0.8 \sim 1.8 \text{ mm/d}$), 围栏外的群落蒸发远远大于围栏内的群落蒸发将近 1 倍。(2) 在整个生长季节中, 围栏内的群落蒸腾 ($0.3 \sim 3.3 \text{ mm/d}$) 始终比围栏外的群落蒸腾 ($0.1 \sim 0.2 \text{ mm/d}$) 高 1~2 倍。这是因为围栏外的退化群落, 植物稀疏, 生物量很低, 盖度小; 而围栏内的恢复群落, 植物密度大, 生物量高, 盖度大, 所以产生上述两项明显差异。(3) 在整个生长季节中, 围栏内、外的群落蒸散值大小及其变化节律大致相同。这说明, 在一定程度上, 草原退化及退化草原恢复并不引起群落蒸散数值明显变化, 但却明显改变 T/E 值。(4) 围栏内、外的群落蒸散均在 6 月下旬出现第 1 次峰值 (约 1.5 mm/d), 接着在 8 月中旬又出现第 2 次峰值 (约 4.0 mm/d)。值得指出的是, 群落蒸腾也同步出现两次峰值; 而群落蒸发在第 1 次时无反应, 在第 2 次时才出现一个比群落蒸腾低的峰值。这表明群落蒸腾的波动反应比群落蒸发的反应较为敏感。图 7 所描绘的是供试群落建群种——羊草生长大周期。这个大周期似乎可以解释群落蒸腾的波动反应或峰值现象。在图 7 的大周期曲线上有两处斜率急升。这两个生长速率明显加快时期恰好与图 6 中该群落蒸腾峰值出现时间相吻合。这表明影响群落蒸发蒸腾的因素, 除了气象、土壤等因素之外, 群落中植物的生长状况也是很重要的因素, 其中群落蒸腾是直接受植物生长状况制约的组分。所以, 群落蒸腾的波动变化比群落蒸发更为敏感。

4 典型草原群落蒸发蒸腾特点

4.1 沙地、草原和草甸群落蒸发蒸腾

4.1.1 三种群落概述

“定位站”位于内蒙古典型草原地区。在该站周围选择具有代表性的三种植物群落进行蒸发蒸腾的比较测定。

沙地半灌木群落(简称沙地群落) 位于“定位站”后沙丘阳坡。沙质土壤, 结构疏松, 透水性能好。土壤含水量虽然不高, 但土壤水势较高, 有利于植物生长。沙蒿(*Artemisia Intrommongolica*), 半灌木, 建群种, 重要值达 68。沙蒿与冷蒿(*Artemisia Frigida*)、冰草(*Agropyron Cristatum*)、沙芦草(*Agropyron Fragile*)、苔草(*Carex Korshinski*)及狗娃花(*Heteropapus Altaitus*)等组成沙蒿-冷蒿群落。群落较稀疏, 盖度仅 20%左右。这种群落在小腾格里沙地有较广的分布。

河漫滩草甸群落(简称草甸群落) 位于“定位站”前阶地坡下的锡林河漫滩。这里地势低洼, 地下水位仅 0.2~0.3 m。土壤呈水分饱和状态, 属于沼泽土。植物群落以小康草(*Agrostis Alba*)和西伯利亚野大麦(*Hordeum Roshivitzii*)为明显优势种, 其次有鹅绒萎陵菜(*Potentilla Anserina*)、毛茛(*Ranunculus Iaponicus*)、脉苔草(*Carex Enervis*)等, 还有海乳草(*Glaux Maritima*)、黄花苜蓿(*Medicago Falcata*)等伴生。群落内植物密集, 分布均匀, 冠层高约 30 cm, 盖度达 95%以上。

羊草草原样地(简称草原群落) 位于锡林河南岸约 10 km 处的平缓丘陵宽谷地带。这里的土壤为暗栗钙土, 土层深厚达 1 m。地下水位很深, 土壤湿度依赖于降雨, 雨后土壤表层(0~40 cm)含水量可达 20%; 无雨时, 土壤常呈半干旱状态, 含水量不足 10%。群落中占明显优势的羊草(*Leymus Chinense*)与大针茅(*Stipa Grandis*)、洽草(*Koeleria Cristata*)、糙隐子草(*Cleistogenes Squarrosa*)和冰草(*Agropyron Cristatum*)等旱生禾草构成群落主体。其余为杂类草, 如黄囊苔草(*Carex Korshinskyi*)、小叶锦鸡儿(*Caragana Microphylla*)、扁蓿豆(*Melissitus Ruthenica*)、冷蒿(*Artemisia Frigida*)、黄蒿(*Artemisia Commutata*)、星毛萎陵菜(*Potentilla Acaulis*)、二裂萎陵菜(*Potentilla Bifurca*)、木地肤(*Kochia Prostrata*)和瓦松(*Orostachys Fimbriatus*)等。杂类草种类多, 虽不是群落主体, 但在群落中也起重要作用。该群落的特点之一是草层明显。上层 50~60 cm 由羊草、大针茅和西伯利亚羽茅的生殖枝构成。中层 30 cm 左右, 主要由禾草的叶层构成, 其间杂着变蒿、麻花头(*Serratula Centauroides*)等杂类草。下层 5~15 cm 由苔草、糙隐子草、冷蒿和星毛萎陵菜等构成的低草层。群落盖度约 40%, 群落冠层中无遮阴现象。

4.1.2 三种群落蒸发蒸腾的比较

1991 年 7 月, 选择雨后间歇期, 从上述三个群落样地取样, 逐日观测群落蒸发蒸腾, 同步测定各样地土壤含水量(0~40 cm)和群落地上生物量。实验测定结果如图 8 和表 2 所示。

图 8 显示了沙地、草原和草甸群落蒸发蒸腾的明显差异。在这三种群落中, 草原群落蒸发最大, 其群落蒸腾稍低于沙地群落, 一天的蒸发、蒸腾量分别达 3.7 mm 和 2.6

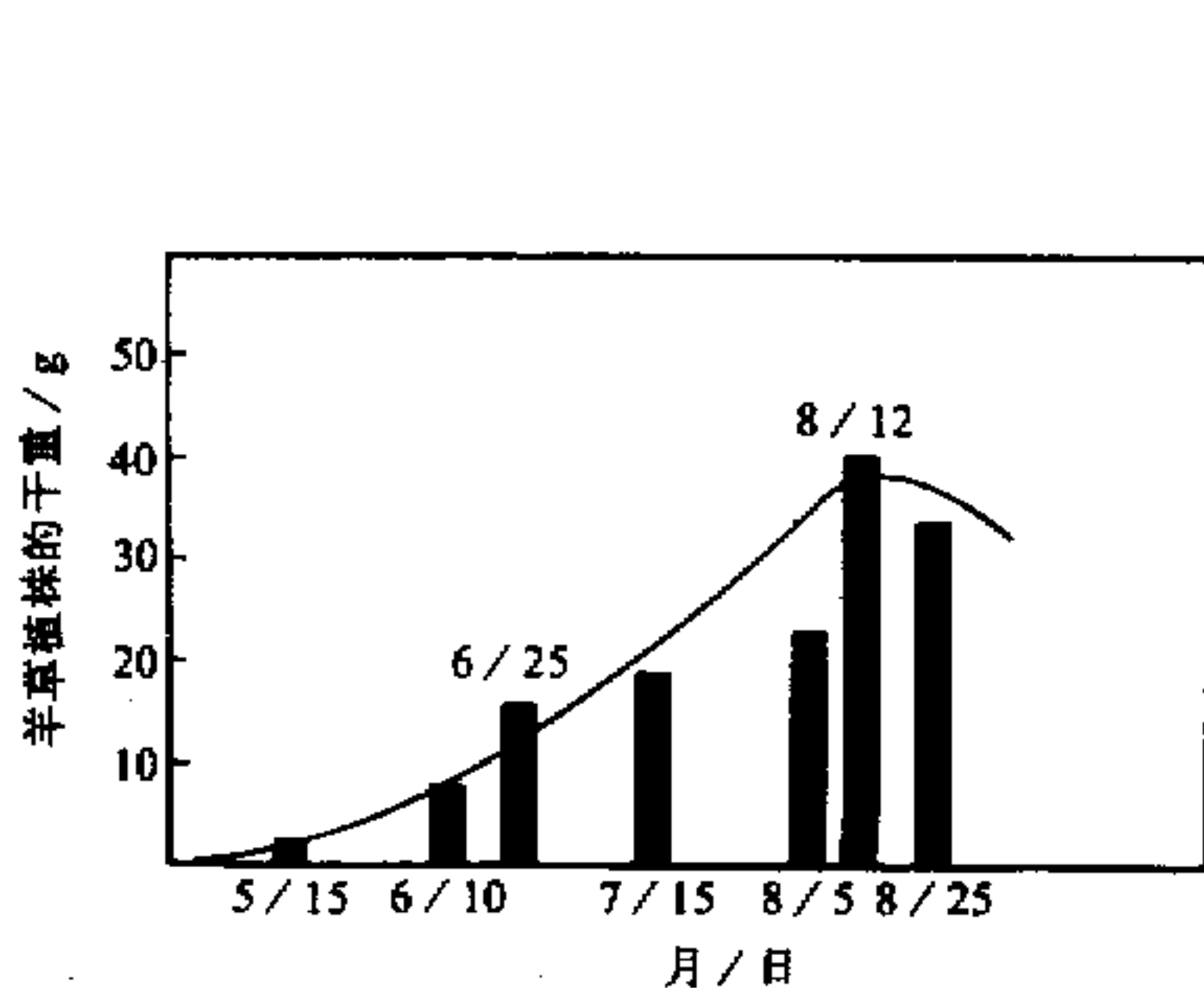


图7 羊草生长大周期曲线

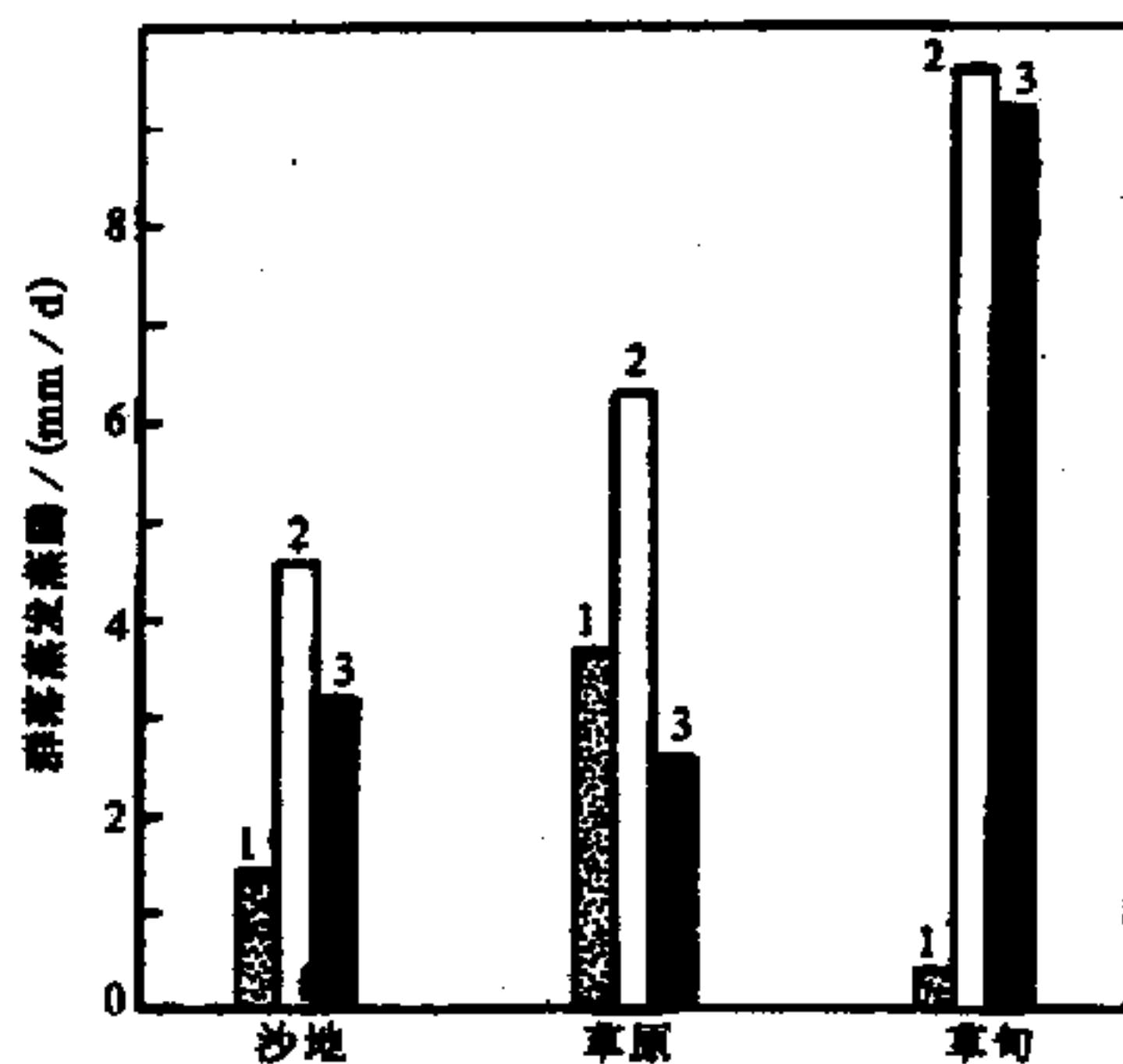


图8 不同植物群落的蒸发蒸腾

1: 蒸发; 2: 蒸腾; 3: 蒸散

表2 不同类型植物群落的生物量及其土壤水分

群落类型	地上生物量(干重)/kg	地下生物量(干重)/kg	土壤含水量/%
沙地群落	0.19	0.41	7.72
草原群落	0.32	0.70	11.18
草甸群落	0.54	1.37	20.74

mm。沙地群落蒸发 (1.4 mm/d) 远低于草原群落, 但其群落蒸腾 (3.2 mm/d) 却高于草原群落。令人注意的是, 草甸群落蒸腾达 9.2 mm/d , 比前两种群落蒸腾高 2~3 倍; 然而, 草甸群落蒸发非常低, 一天的蒸发量仅 0.4 mm 。为什么在相同的气象条件 (如太阳辐射、气温等) 下不同植物群落的蒸发蒸腾竟发生如此大的差异?

本实验的测定方法表明, 这里所谓群落蒸发指的是群落中植物裸间的地表蒸发; 所谓群落蒸腾是指群落中所有植物蒸腾之和。由于土柱取样和观测时间选为雨后期, 各群落的土壤水分状况良好。从表 2 可见, 草原群落的土壤含水量达 11.18%, 相当于 -0.03 MPa 土壤水势^[7], 植物生长旺盛, 地上生物量 (主要是绿色的光合蒸腾器官) 达 0.32 kg/m^2 。因此, 草原群落仍具有相当大的群落蒸腾值。另一方面, 草原群落盖度不高 (不足 40%), 草层中无遮阴现象, 故草原群落在夏日里会出现较大的蒸发量。沙地土壤结构疏松, 透水性能好, 雨后很快形成干沙层, 阻碍土壤水分蒸发。在土柱取样时, 沙地土壤含水量为 7.27% (0~40 cm)。这意味着沙地上层土壤水势是相当高的 (大约低于 -0.05 MPa)。因此, 沙地群落不但蒸发比草原群落低很多, 而且沙地植物因供水充足, 其植物蒸腾又远高于草原植物^[8], 故导致沙地群落蒸腾高于草原群落。

与草原和沙地大不相同的是, 草甸土壤含水量达 20.74%, 即土壤呈水分饱和状态, 植物生长茂盛, 地上生物量大 (0.45 kg/m^2), 必然有非常大的群落蒸腾值。而非常小的群落蒸发 (仅为其群落蒸腾的 4%), 主要是由于草甸群落植物密集, 每平方米达 2736 株, 群落盖度几乎为 100%。如此密集的草丛水不但阻碍蒸发水汽扩散, 而且遮挡太阳辐射, 降低土壤温度。这种减小水分蒸发动力 (降温) 和增大水汽扩散阻力的

双重作用结果, 导致草甸群落蒸发如此之小。

群落蒸散等于群落蒸发与群落蒸腾之和。凡是影响群落蒸发和群落蒸腾的因素都会影响群落蒸散。群落蒸散组分(蒸发和蒸腾)比例的差异形成了明显不同的三种群落蒸散特点。沙地群落蒸散最低(4.6 mm/d), 草原群落蒸散比沙地高 37%, 而草甸群落蒸散则超出沙地的 109%。将图 8 中的群落蒸散与表 2 中群落地上生物量和土壤含水量相比较, 可以发现, 群落蒸散随群落生物量和土壤含水量增加而增大, 呈线性正相关, 相关系数为 0.7~0.9。显然, 土壤水分和群落生物量是影响群落蒸散的重要因素。半干旱地区草原生产力通常决定于水分因子, 因此, 土壤水分对草原群落蒸散的影响可能起着主导作用。

4.2 羊草草原和大针茅草原的蒸发蒸腾

4.2.1 羊草群落和大针茅群落的主要有关背景值

羊草草原是实验区分布面积最大, 经济价值最高的草原类型。“定位站”在锡林河南岸宽谷地带的典型羊草群落地段设有羊草草原实验样地(No.1 样地)。而大针茅草原则是本地区半干旱地带性的代表草原类型。同样, “定位站”在伊和乌拉西南一级台地的典型大针茅群落地段设有大针茅草原实验样地(No.2 样地)。表 3 简要对比说明这两种群落的主要有关背景值。羊草群落的建群种和优势种多为旱中生生态型, 生境较为湿润, 土壤含水量较高。大针茅群落的建群种和优势种多为旱生生态型, 生境较干旱, 土壤含水量较低。羊草群落生物量及盖度明显高于大针茅群落, 是这两个群落的一个显著差别。

表 3 羊草群落和大针茅群落的主要有关背景值

样 地	No.1	No.2
群落类型	羊草群落	大针茅群落
建群种	羊草	大针茅
主要优势种	冰草、苔草、扁蓿豆、麻花头	冰草、冷蒿、变蒿、冷蒿
生 境	水分条件较好的平缓坡地、谷地、塔拉等, 湿润系数为 0.6~0.8, 海拔为 1200 m	水分条件较差的台地、坡地等, 典型半干旱地带性生境。湿润系数为 0.3~0.45, 海拔为 1130 m
土壤类型	壤质暗栗钙土, 土层深厚	沙壤质典型栗钙土, 土层薄
土壤含水量	7%~20%	5%~15%
群落盖度	~40%	~25%
地上生物量(干重)/(g/m ²)	142.0	125.0

4.2.2 羊草群落与大针茅群落的蒸发蒸腾比较

根据群落蒸发蒸腾与群落生物量和土壤水分呈正相关的规律, 表 3 中的背景值意味着羊草群落蒸发蒸腾要大于大针茅群落, 但从表 3 却难以判断这两个群落的蒸发和蒸腾及其对群落蒸散贡献的比例。1992 年 7~8 月, 对 No.1 和 No.2 样地的群落蒸发蒸腾进行了实验测定, 结果如图 9 所示。

比较图 9a 和图 9b 可以发现, 羊草群落蒸腾(平均 3.2 mm/d)明显高于大针茅群落蒸腾(平均 1.9 mm/d)。前者占群落蒸散的 75%, 后者仅占群落蒸散的 50%; 而羊草群落蒸发(平均 1.6 mm/d)则略低于大针茅群落蒸发(平均 1.8 mm/d)。出现这种特征的主要原因是, 羊草群落不仅地上生物量(142.0 g/m², 干重)大于大针茅群落地上生物量(125.0 g/m², 干重), 而且羊草群落优势植物的叶片蒸腾速率多半高

于大针茅群落优势植物的叶片蒸腾速率^[9]。另外,羊草群落盖度(40%)也大于大针茅群落盖度(25%),致使羊草群落蒸发低于大针茅群落。因此,羊草群落蒸散主要来自群落蒸腾的贡献;而大针茅群落蒸散则是由群落蒸腾和群落蒸发同等贡献的结果。

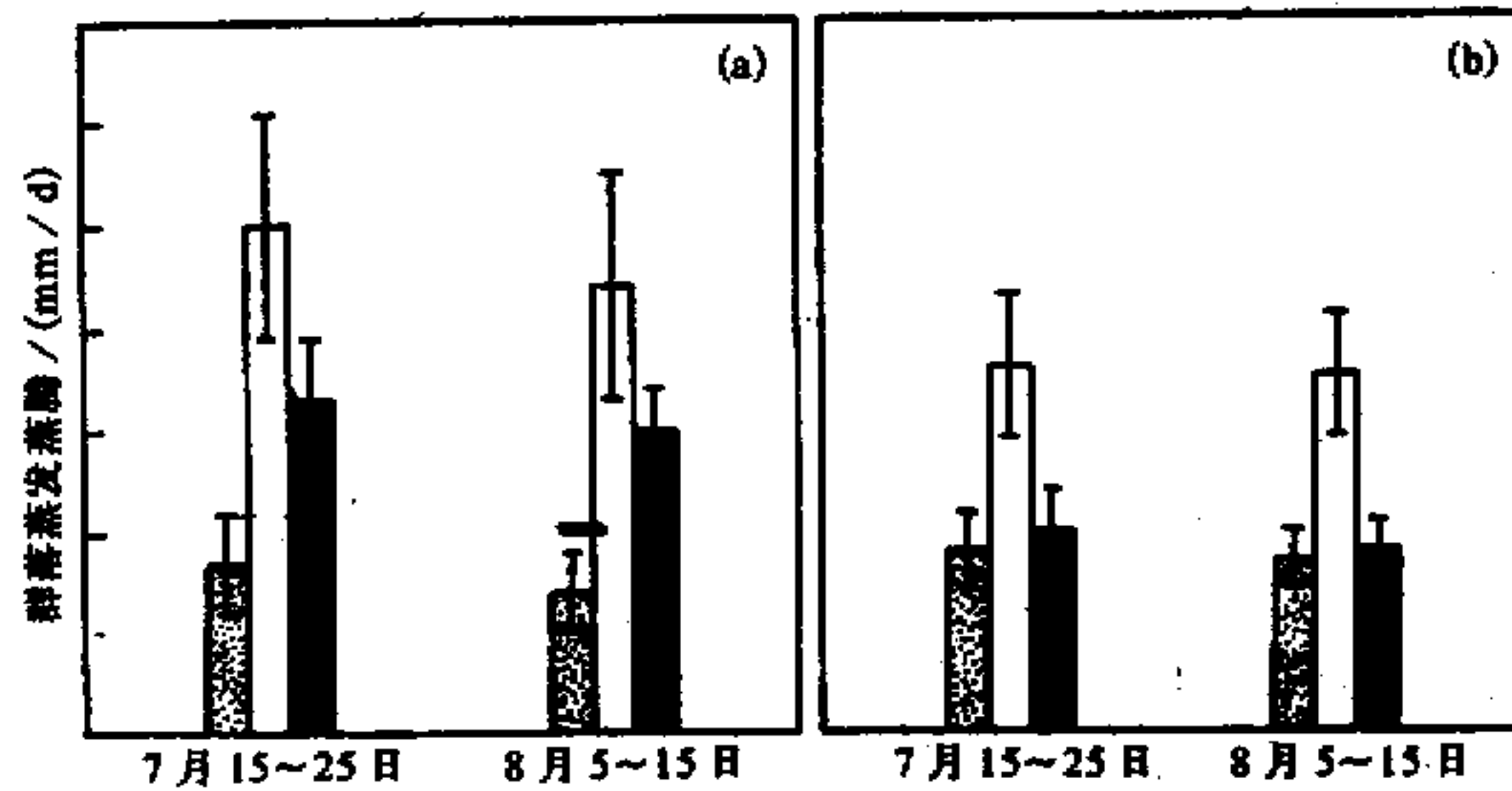


图9 羊草草原(a)和大针茅草原(b)群落蒸发蒸腾的比较

总的来看,羊草群落蒸散(平均 4.7 mm/d)明显高于大针茅群落蒸散(平均 3.7 mm/d)。除了上面分析的影响群落蒸发蒸腾的原因之外,群落的水分状况是影响蒸发蒸腾的另一个重要因素。如表3所列,羊草群落生境的水分条件明显好于大针茅群落生境。羊草草原土壤水分通常比大针茅草原高出 $2\% \sim 5\%$ 。在本次实验观测期间,羊草样地和大针茅样地的土壤含水量实测值分别为 13.2% 和 9.3% 。由此再一次表明,草原群落蒸散与群落水分状况及其土壤含水量呈正相关的规律。

4.2.3 羊草群落蒸发蒸腾的季节变化

在1989年5~9月的生长季节中,从羊草样地定期进行土柱取样,观测羊草群落蒸发蒸腾的季节变化。主要结果如图10所示。

自上年秋冬至当年早春(1988年10月~1989年4月),降水偏多,累积达 35 mm ,因此草原土壤墒情较好。从图10可见,5月份草原返青,羊草群落蒸腾很快达到 0.44 mm/d ,群落蒸发为 0.55 mm/d 。6月份气温升高,雨量增加,植物生长旺盛,群落蒸腾达到 1.47 mm/d ,群落蒸发达到 1.36 mm/d ,群落蒸散达到 2.83 mm/d ,成为整个生长季节中的最高值。7月份为草原植物生长发育顶盛期,然而由于降雨少,则群落蒸腾和群落蒸发大幅度降低,分别降低到 0.27 mm/d 和 0.46 mm/d ,群落蒸散为 0.73 mm/d 成为整个生长季节中的最低值。8月份气温高,降雨量增加,群落生物量大,故群落蒸腾和群落蒸发保持较高水平,分别为 0.89 mm/d 和 1.03 mm/d 。9月份气温明显降低,但雨量大,群落蒸发和群落蒸腾仍保持与8月份相当的水平,分别为 0.98 mm/d 和 0.99 mm/d ,群落蒸散为 1.95 mm/d ,略高于8月份的群落蒸散。

图10及其上述分析表明,在生长季节进程中,从春季开始,羊草群落蒸发蒸腾随气温升高而升高。在通常情况下,在夏季羊草群落蒸发蒸腾达到最高峰,然后随着气温降低而降低。然而,羊草群落蒸发蒸腾又明显地受变化很大的降雨量的制约。因此,羊草群落蒸发蒸腾的季节变化时而出现较大幅度的波动。如图10所示,7月上半月无雨,则羊草群落蒸发蒸腾降至整个生长季节中的最低值。

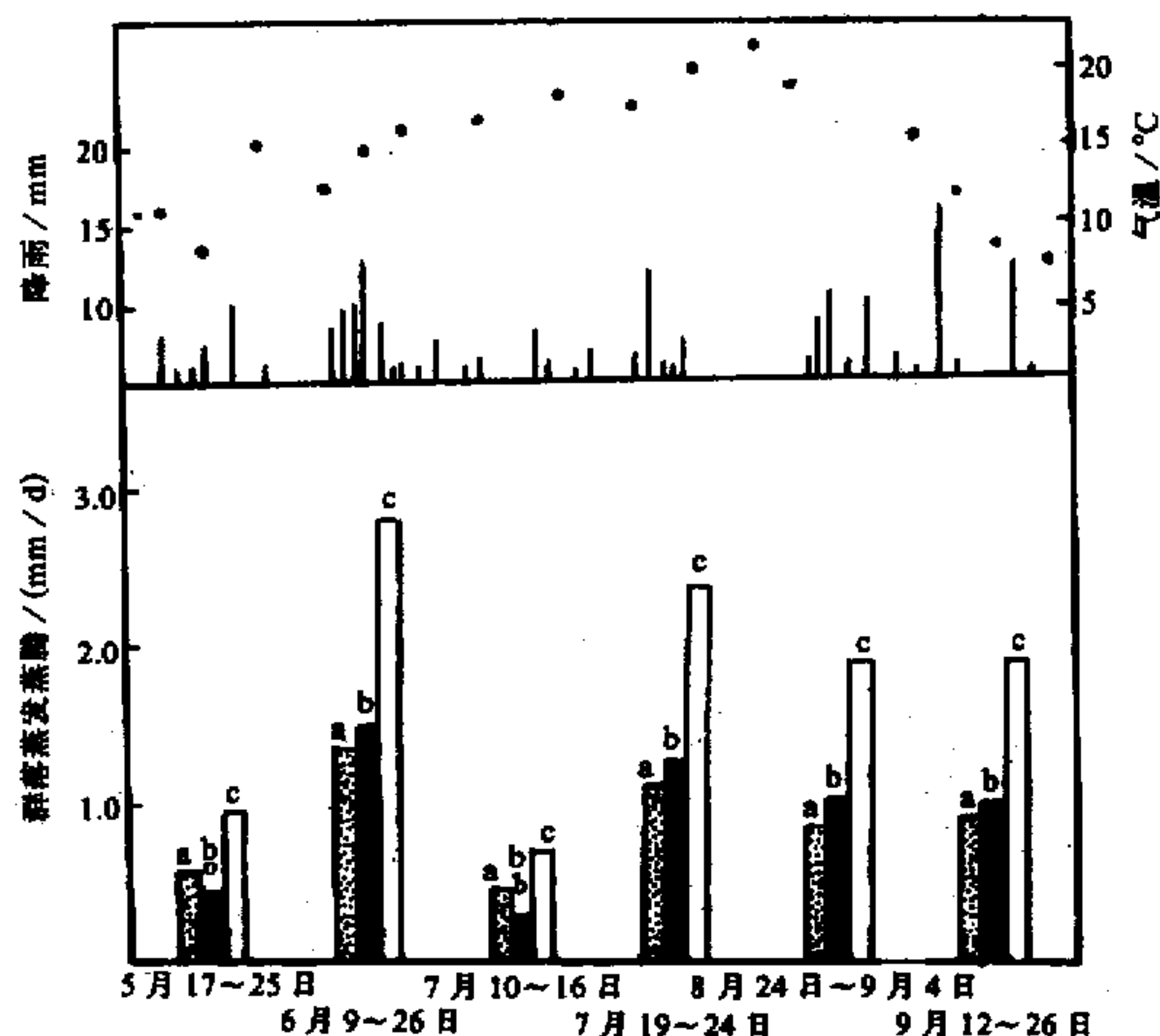


图 10 羊草草原蒸发蒸腾的季节变化。a: 蒸发; b: 蒸腾; c: 蒸散

5 关于羊草草原水分收支的讨论

一个区域的水分收入包括大气降水、地表径流(入)和地下水补给;水分支出包括植物群落蒸发蒸腾、地表径流(出)和土壤重力水下渗。对于地形平坦、地下水位达数十米的羊草草原来说,水分收支中的地表径流(出、入)和地下水补给可以忽略不计。另外,羊草草原分布于半干旱栗钙土地区,降水量小,土壤剖面中常有钙积层阻隔水分下渗,水分渗透深度一般为40~50 cm左右。因此,除了个别多雨年之外,土壤水分下渗的支出也可以忽略不计。这样,只要测得大气降水和群落蒸发蒸腾两项数据,就可以对羊草草原的水分收支问题进行讨论了。

根据1989年5~9月所观测的羊草群落蒸发蒸腾季节变化的资料(见图10),可以推算出羊草草原在生长季节中逐月的群落蒸散量,与同期大气降水量相比的结果如图11所示。

从图11可以看出,5月份和7月份的羊草群落水分收支相抵,6、8、9月份的群落蒸散量略大于同期的大气降水量,呈较轻度的水分亏缺状态。在整个生长季节中,羊草群落的累积水分亏缺为38.0 mm。这种在生长季节中,羊草群落蒸散量略超过大气降水量而产生的轻度水分亏缺现象,与其土壤剖面含水量季节变化(如图12)是相符合的。如图12所示,0~40 cm浅层土壤含水量随降雨变化明显,与羊草群落蒸发蒸腾的季节变化相呼应(见图10)。这说明浅层土壤水分来自大气降水,又消耗于群落蒸发蒸腾,其不足部分(水分亏缺)可以得到40 cm以下深层土壤水分的补给,致使深层土壤水分在整个生长季节中呈逐渐耗尽趋势。5月份,40 cm以下的深层土壤水分明显高

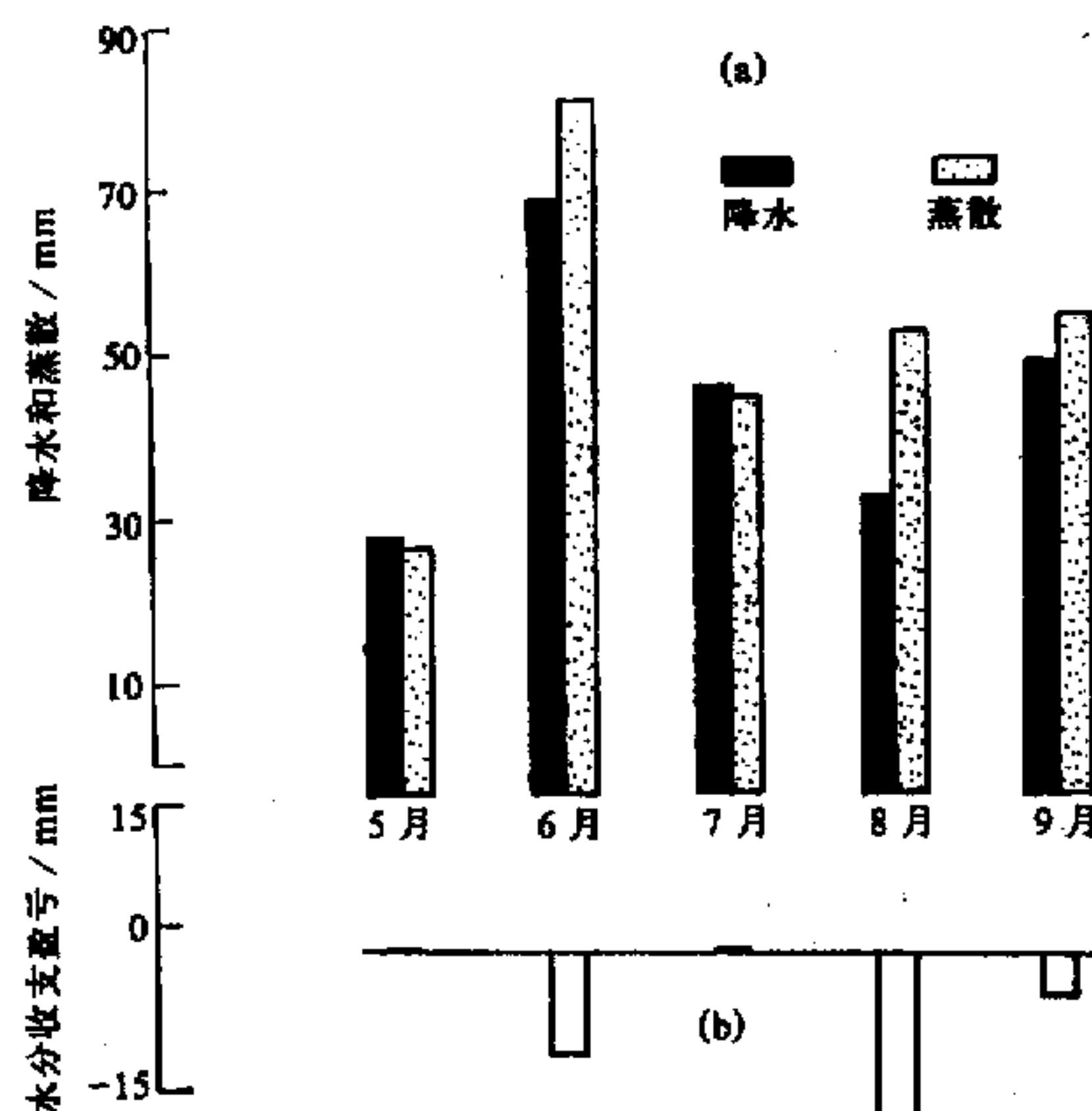


图 11 (a) 降水量与羊草群落蒸散; (b) 水分收支盈亏

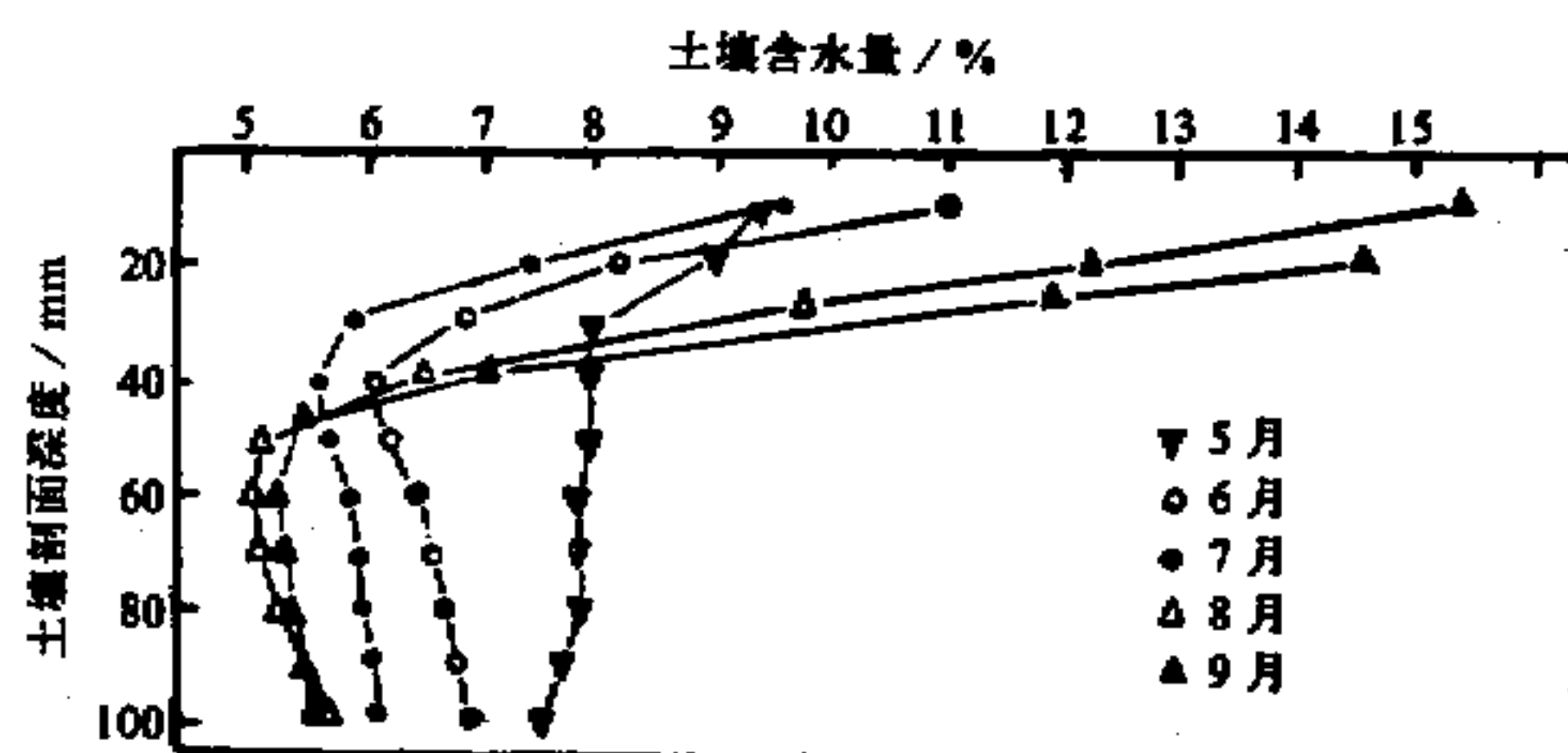


图 12 羊草草原土壤剖面含水量的季节变化

于其它月份,其原因在于深层土壤水分得到以前非生长季节大气降水的补给,特别是去冬降雪的补给。

应该指出的是,同年非生长季节(1989年1~4月和10~12月,共7个月)的大气降水量为39.3 mm。这个数值在羊草群落水分收支的计算上,恰好与同年生长季节中羊草群落蒸散所产生的累计水分亏缺值(-38.0 mm)相抵。因此可以说,1989年实验地区羊草草原的水分收支是大体上平衡的。

参 考 文 献

- 1 Philip, J.R., 1996, Plant water relations:some physical aspects, *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 17, 245~268.
- 2 Sharma, M.L., 1984, *Evapotranspiration from Plant Communities*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 325~326.
- 3 姜恕, 1988, 草原生态系统试验地的设置及植被背景, 草原生态系统研究, 第3集, 北京, 科学出版社, 3~4.

- 4 唐登根、程维新、洪嘉珪, 1984, 我国蒸发研究的概况与展望, 地理研究, 3(3), 84~97.
- 5 闰顺国、段舜山, 1991, 测定草地植被蒸发量的微气象学方法, 中国草地, No.57, 51~55.
- 6 宋炳煜、尹青, 1988, 草原植物群落蒸腾耗水量的测定方法比较, 草原生态系统研究, 第2集, 北京: 科学出版社, 224~232.
- 7 李绍良, 1985, 草原土壤水分状况与植物生长量关系的初步研究, 草原生态系统研究, 第1集, 北京: 科学出版社, 195~201.
- 8 宋炳煜、郭柯、李凤民, 1984, 内蒙古锡林郭勒盟白音锡勒牧场沙地植物的蒸腾特点, 中国草原, No.22, 54~58.
- 9 宋炳煜、李燕红、颜铭, 1985, 锡林河流域羊草草原的植物蒸腾特点及其群落水分利用的初步研究, 草原生态系统研究, 第1集, 83~92.

Study on Evapotranspiration from Plant Communities of the Steppe

Song Bingyu

(Inner Mongolia University, Huhhot 010021)

Abstract Evapotranspiration from the communities of the steppe was measured by the method of soil column at Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences. The results were as follows: (1) Effects of the soil factors: (a) Under normal conditions, evaporation, transpiration and evapotranspiration from the community increased with the soil moisture. When the soil was too wet, transpiration from the community decreased due to that the plants were damaged by waterlogging. (b) Under low soil moisture condition, evaporation from the community decreased with soil clay content. Under high soil moisture condition, evaporation from the community increased with soil clay content. (c) Evaporations from the community having different soil moisture were increasing with increase in the soil compaction, and reached their maximums successively. The drier the soil was, the later the maximum reached. (2) Effects of the grazing factors: transpiration from the community was negatively correlated with the grazing pressure, but evaporation from the community was positively correlated with the grazing pressure. Decrement of the community biomass with the grazing pressure was the key reason for the positive and negative correlation. (3) Evapotranspiration from the deteriorative and its recovery communities: increase in evaporation and decrease in transpiration were caused by deterioration of the community, otherwise, decrease in evaporation and increase in transpiration were caused by recovery of the community. To a certain extent, T/E value of the community could be greatly changed by deterioration or recovery of the community, but evapotranspiration from the community kept constant. (4) The transpiration from the meadow community was the highest (9.2 mm/d), being the 2~3 times of the other two communities; while the evaporation from the meadow was the lowest evaporation (0.4 mm/d), being only 1/4 of that from the sandyland or 1/8 of that from the steppe. (5) A comparative measurement of the evapotranspiration from the two typical steppe communities dominated by *L. chinense* and *S. grandis* showed that the evapotranspiration from *L. chinensis* community (4.4~5.0 mm/d) was higher than that from *S. grandis* community (3.5~3.8 mm/d). Ratio of transpiration to evaporation (T/E) was also much higher in *L. chinense* community ($=2$) than in *S. grandis* community ($=1$). (6) The seasonal change of evapotranspiration from *L. chinense* community was in accordance with the change of air temperature; but showed as big fluctuation due to change of rainfalls. The water budget of the community approximately balances.

Key words steppe community evapotranspiration ground factor balance of water budget