

新疆塔里木河下游胡杨水势变化及其意义探讨

付爱红 陈亚宁 李卫红

(中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011. E-mail: xiaohong7918@163.com)

摘要 结合塔里木河下游生态输水过程中对不同断面胡杨叶水势的变化的测定, 分析了地下水埋深和土壤盐分变化对胡杨叶水势的影响。结果表明, 胡杨叶水势与地下水埋深之间存在显著的负相关关系, 表现为地下水埋深较浅的断面, 胡杨叶水势较高, 胡杨所受的干旱胁迫强度较小; 反之, 胡杨叶水势则较低, 胡杨所受的干旱胁迫强度也较大; 同时, 土壤盐分与胡杨叶水势之间也存在显著的负相关关系, 土壤盐分较大处的胡杨叶水势较低, 胡杨所受的盐胁迫强度也较大。空间上表现为: 下游段断面和输水河道主轴线较远的部位, 地下水埋深较大, 土壤盐分亦较大, 而胡杨叶水势则较低。胡杨叶水势变化指示胡杨受干旱、盐胁迫程度, 对塔里木河下游胡杨生存的合理地下水位研究具有重要参考意义。

关键词 胡杨 叶水势 地下水埋深 土壤盐分 塔里木河下游

胡杨(*Populus euphratica oliv.*)是新疆塔里木河下游地区天然分布的最主要和最广泛的乔木树种, 具有喜光、耐盐碱、耐热、耐旱、耐涝、抗寒的特点, 能适应典型的大陆性气候, 是维系塔里木河流域生态系统和“绿色走廊”生存的主体。它具有维护分布区内的生态平衡, 保障绿洲农牧业生产和为居民生活提供用材等作用, 有较高的生态、经济和社会效益, 所以备受关注。许多学者对胡杨的抗旱性和耐盐性进行过研究^[1-8], 并对塔里木河下游生态输水过程中地下水埋深与天然植被生理指标进行了测试分析, 探讨了塔里木河下游胡杨对生态输水的响应, 分析得出了塔里木河下游不同地下水埋深条件下胡杨叶片中脯氨酸(Pro)、脱落酸(Abscisic acid, 简称 ABA)、MDA 含量随干旱胁迫程度的增强呈现出明显增加态势的结论^[1-3]。还有学者对胡杨抗盐性特点进行了研究, 认为胡杨是一种非盐生植物(non-halophytes), 在盐胁迫下, 胡杨具有限制盐离子进入叶组织从而减少对光合器官伤害的能力, 也就是说胡杨有很强的拒吸机制^[4,5]。此外, 有学者通过对胡杨种子萌发期的抗盐性机理的研究, 指出随着盐溶液浓度的增加, 胡杨种子的相对发芽率及子叶展平率的降低速率较慢, 并分析得出胡杨在盐胁迫下会出现稳定膜结构并合成可兼容溶质有关的蛋白^[6-8]。这些研究从不同角度揭示了胡杨的抗旱、耐盐机理。然而, 有关不同土壤水分和土壤盐分对天然胡杨叶水势变化影响的研究尚较少。

植物水势是反映植物组织水分状况或植物水分亏缺的一个直接指标, 它与土壤水分和盐分的变化密切相关。植物组织水势的大小, 能反映它对周围环

境的吸水能力。通常植物组织的水势愈低, 则吸水能力愈强; 反之吸水能力则较弱, 这种变化规律可用以确定植物的受旱程度和抗旱能力^[9]。目前有关干旱、盐胁迫环境下的植物水势变化的研究主要集中于作物上, 研究经过不同处理后作物叶、茎水势对干旱、盐胁迫的响应^[10,11], 作物在施肥前后叶、茎水势的变化, 以及不同时段茎、叶水势对土壤水势的反映情况等^[11,12]。本文根据塔里木河下游生态输水后不同断面环境条件下天然植物胡杨叶水势的变化, 分析地下水埋深、土壤盐分对胡杨叶水势的影响, 旨在剖析胡杨叶水势变化所揭示的环境变化和生态意义, 为塔里木河下游科学地进行生态输水, 恢复和重建受损生态系统提供科学依据。

1 研究区和方法

1.1 研究区概况

塔里木河下游位于新疆塔里木盆地东部, 全长 428 km, 穿行在塔克拉玛干沙漠和库鲁克沙漠之间, 是中国西部最干旱的一隅, 也是生态与环境问题最为突出的地区之一。由于塔里木河上中游高强度的水资源开发利用, 塔里木河下游大西海子以下自 20 世纪 70 年代彻底断流, 导致地下水埋深大幅度下降, 生态系统严重受损, 由地下水维系的植物群落沿草、灌、乔秩序逐步退化或死亡^[13], 胡杨林面积已由 20 世纪 50 年代的 $5.3 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 减少到 90 年代的 $0.67 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 沙漠化过程加剧^[14,15]。

塔里木河下游属于典型的暖温带大陆性干旱气候, 年均气温 10.7°C , 年积温 4167.7°C , 太阳总辐射

量为 6180 MJ/m², 年日照数约 3118.7 h, 无霜期 220 天, 平均降水量 33.6 mm, 年蒸发量为 2671.4 mm, 蒸发量为降水量的 79 倍, 风沙危害严重^[16].

1.2 资料采集

本文分析数据取自新疆塔里木河下游亚合浦马汗(B)、英苏(C)和喀尔达依(D)断面(图 1). 在以上 3 个断面垂直于河道的方向上, 根据地下水监测井的布局, 距河道主轴线由近及远, 在 B, C 和 E 断面分别选择连续的 3 个地下水埋深监测井, 即: B1, B2, B3, C1, C2, C3, E1, E2 和 E3 进行试验, 这 3 个井距各断面河道主轴线分别为 50, 150 和 250 m, 采用电导法分别对以上 6 个井的地下水埋深变化数据进行收集. 与此同时, 使用原位盐分仪, 测定 B2, C1, C2, C3 和 E2 井附近剖面距地表 50~100, 100~150 和 150~200 cm 处的土壤盐分. 选择监测井附近的胡杨作为试材样本, 胡杨年龄为 30~40 年, 平均高度 8 m 左右, 平均胸径约 30 cm². 试验期间天气晴朗, 地下水埋深在 1.5~6.0 m 之间变化.

胡杨叶水势测定: 采用美国 WESCOR 公司生产的 HR-33T 露点水势仪(Dew Point Microvolt-meter)实地测定得到. 测定时在胡杨树距地 1.5m 高度部位上, 摘取生长发育正常、且太阳直射部位的卵圆形叶片, 立即装入密封塑料袋中, 随后, 在叶子中部剪截半径约 2 mm 的叶片, 置于露点水势仪 C-52 样品室中, 并将样品室与水势仪连接. 根据样品室温度和传感器型号设置适宜的 Π_v 值, 读取 μ_v 值, 按照 $\mu_v = 7.5$ 计算被测叶水势值(MPa).

测定时间: 2005 年 7, 8 和 9 月份, 每月份选定一个标准日测定一个日进程, 水势日变化的测定从 8:00 至 20:00, 每隔 2 h 取样一次, 重复 3 次测量, 求其平均值.

2 结果与分析

2.1 胡杨叶水势变化

(1) 不同断面胡杨叶水势均值比较. 通过对采集数据进行均值比较获得表 1. 偏差是描述数据正态分布状况的统计量, 当偏差值绝对值大于 1 时, 数据不服从正态分布. 反之, 则呈正态分布, 但分布有偏向, 具有一个较长的尾巴. 由于 B1 和 B3 井偏差值均大于 1, 所以, B 断面胡杨叶水势数据不服从正态分布; C 和 E 断面偏差值均小于 1, 胡杨叶水势数据呈正态分布. 从表 1 可以看出, 不论是距河道 50 和 150 m 还是 250 m, 从 B 到 E 断面胡杨叶水势均值先增大后减小; 在距河道 150 和 250 m 处, 从 B 到 E 断面方差先减小后增大, 在距河道 50 m 处, 方差逐渐减小. E 断面胡杨叶水势与 B 断面相比, 差值仅为 0.1, 说明在经过 6 次输水后, E 断面干旱程度在逐渐减轻.

(2) 不同月份胡杨叶水势统计分析. 通过执行 Analyze-Compare Means-Means 命令, 对 B, C 和 E 断面 7, 8 和 9 月份胡杨叶水势数据进行均值比较和方差分析(表 2 和 3). 由表 2 可知, 9 月份胡杨叶水势均值普遍低于 7 月份和 8 月份, 标准差和方差普遍高于 7 月份和 8 月份. 9 月份虽正处于输水期间, 地下水埋深迅速抬升, 但输水初期胡杨对地下水埋深的抬升还没有充分地响应. 实际上, 9 月份胡杨所受的干旱胁迫强度大于 7 月份和 8 月份. 通过对 7, 8 和 9 月份 8:00 到 20:00 所测的胡杨叶水势数据进行方差分析(表 3), 发现 8:00 到 16:00 显著性水平平均接近于 0.05, 差幅最大仅为 0.02, 说明在这段时间内 7, 8 和 9 月份胡杨叶水势均值存在显著差异; 18:00 和 20:00 显著性水平均大于 0.05, 差幅最大达 0.37, 说明在黄昏时刻 7, 8 和 9 月份胡杨叶水势均值不存在显著差异. 在排除 9 月份

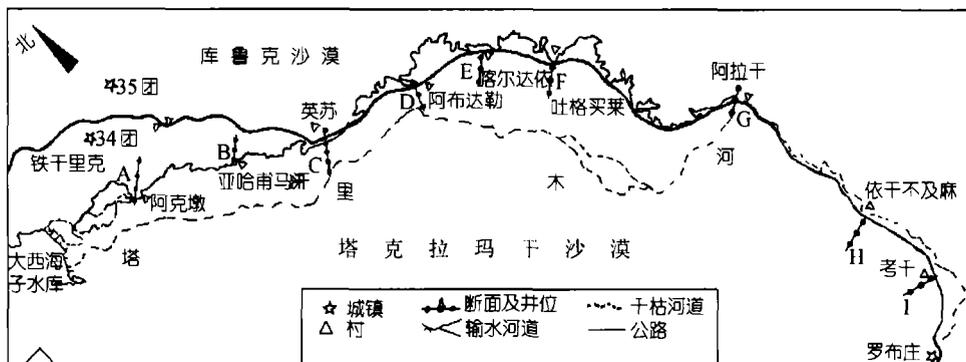


图 1 新疆塔里木河下游 9 个监测断面分布示意图

表 1 胡杨叶水势的描述统计量

距河道距离/m	井位	均值/MPa	均值标准误	标准差	方差	偏差	偏差标准误	极差	最小值	最大值
50	B1	-6.50	0.30	1.11	1.24	-2.04	0.59	4.38	-9.69	-5.31
	C1	-5.97	0.16	0.61	0.37	-0.02	0.59	2.10	-7.08	-4.98
	E1	-6.34	0.15	0.54	0.29	-0.14	0.59	1.68	-7.19	-5.51
150	B2	-6.65	0.13	0.50	0.25	0.09	0.59	1.93	-7.60	-5.67
	C2	-6.15	0.12	0.43	0.19	0.55	0.59	1.42	-6.73	-5.31
	E2	-6.60	0.19	0.71	0.50	0.42	0.59	2.24	-7.53	-5.29
250	B3	-6.99	0.29	1.08	1.18	-2.21	0.59	4.17	-10.22	-6.05
	C3	-6.52	0.13	0.51	0.25	-0.20	0.59	1.86	-7.57	-5.71
	E3	-6.77	0.15	0.57	0.33	0.17	0.59	2.36	-7.91	-5.55

表 2 胡杨叶水势均值比较

月份		8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
7	均值/MPa	-6.36	-5.82	-6.26	-7.22	-6.11	-6.46	-7.76
8		-6.07	-6.15	-6.35	-6.37	-6.62	-6.79	-6.91
9		-7.06	-7.27	-7.67	-7.73	-7.74	-7.51	-7.64
7	标准差	0.58	0.42	0.36	0.62	0.32	0.54	1.79
8		0.39	0.45	0.74	0.53	0.78	0.55	0.31
9		1.21	1.55	1.78	1.78	1.78	1.78	1.71
7	方差	0.34	0.18	0.13	0.38	0.11	0.29	3.21
8		0.15	0.21	0.56	0.28	0.61	0.30	0.09
9		1.4	2.4	3.2	3.16	3.15	3.18	2.93

地下水埋深抬升这一因素外, 气候因子对胡杨叶水势变化起着十分重要的作用。

2.2 胡杨叶水势变化影响因素分析

(1) 地下水埋深对胡杨叶水势的影响. 塔里木河下游降水稀少, 天然植物生长所需的土壤水分主要由地下水供给, 地下水埋深的高低决定着土壤含水量的大小. 为了挽救塔里木河下游濒临灭绝的“绿色走廊”, 于 2000 年 5 月份开始对塔里木河下游实施生态应急输水工程, 截至 2005 年 6 月份已向塔里木河下游间歇性输水 7 次. 与第 1 次输水后地下水埋深相比, 第 7 次输水后, 横向(不同井位)和纵向(不同断面)上地下水埋深均有不同程度的抬升(表 4). 已有研究得出, 第 1 次输水后, 距河道 250 m 范围内的地下水埋深仍远远超过 7 m, 胡杨受到中—重度水分胁迫, 生长发育受到明显的抑制, 并面临着死亡的威胁^[2]. 在经过 7 次输水后, 河道两侧地下水埋深明显抬升, 在距河道 500 m 范围内, 地下水埋深普遍由以前的 8 m 以下升到现在的 4 m 左右^[17], 胡杨生存得到保障. 通过分析胡杨叶水势与地下水埋深之间的相关性(表 4), 得知它们之间存在显著的负相关关系, 尤其是 C 断面相关系数达 -0.768. B 和 E 断面相关系数虽没有超过 -0.4, 但 P 值却小于 0.05, 相关性依然很显著. 生态输水是塔里木河下游荒漠河岸区地下水埋深抬升的惟一有效途径, 当地下水埋深

抬升到一定范围时, 胡杨叶水势开始增高, 胡杨不再遭受水分胁迫, 开始迅速生长.

分析 B, C 和 E 断面 7, 8 和 9 月份距河道 250 m 范围内地下水埋深变化可见(图 2), 8 月份地下水埋深普遍比 7 月份大, B, C 和 E 断面 E1 井位处 9 月份地下水埋深普遍低于 7 和 8 月份, E 断面 E2 和 E3 井位处地下水埋深仍然高于 7 和 8 月份, 说明 E2 和 E3 井对输水还没有充分地响应. 8 月份地下水埋深虽高于 7 月份, 但相差不大, 所以, 8 月份胡杨叶水势略低于 7 月份. 9 月份 B 和 C 断面地下水埋深虽明显变浅, 但胡杨叶水势并没有升高, 反而下降. 这似乎与它们之间所具有的负相关关系相矛盾, 其实不然. 9 月份初正好处于第 8 次生态输水期间, 虽然, B 和 C 断面河岸两侧地下水埋深迅速抬升, 但输水初期胡杨叶水势对地下水埋深的抬升还没有充分地响应. 实际上, 此时, 胡杨所受的干旱胁迫程度要大于 7 和 8 月份, 所以, 胡杨叶水势不升反降. 至于 E 断面 E2 和 E3 井位, 由于 7-9 月份地下水埋深逐渐增大, 所以, 胡杨叶水势逐渐降低.

由图 2 还可以清晰地看出, C 断面三井位处地下水埋深变化范围为 1.5~5 m, 而 B 和 E 断面地下水埋深变化范围分别为 3.0~5.8 m 和 5.4~6.0 m, 普遍高于 C 断面. 由于地下水埋深对胡杨叶水势的影响呈负效应, 所以, C 断面胡杨叶水势最高, E 断面胡杨叶水势最低.

表3 胡杨叶水势的方差分析

时间	平方和	自由度	均方	F 统计量	显著性水平
8:00	4.56	2	2.28	3.26	0.06
10:00	9.23	2	4.62	4.44	0.03
12:00	10.33	2	5.16	3.55	0.05
14:00	8.48	2	4.24	3.03	0.07
16:00	10.86	2	5.43	3.71	0.04
18:00	4.46	2	2.23	1.59	0.23
20:00	3.49	2	1.74	0.91	0.42

表4 不同断面输水后地下水埋深变化及其与胡杨叶水势相关性

断面	井位	距河道距离 /m	地下水埋深/m			胡杨叶水势 ^{a)} /MPa	
			第1次输水后 (2000-05-14)	第6次输水后 (2004-12-11)	第7次输水后 (2005-08-08)	R	P
亚合浦马汗(B)	B1	50	7.78	4.11	3.77	-0.314	0.043
	B2	150	-	5.7	3.84		
	B3	250	-	5.76	5.56		
英苏(C)	C1	50	8.34	3.72	1.57	-0.768	0.000
	C2	150	9.87	4.38	3.15		
	C3	250	-	4.94	5.15		
喀尔达依(D)	E1	50	9.16	-	5.48	-0.378	0.048
	E2	150	-	5.57	5.83		
	E3	250	-	5.77	5.64		

a) R 为相关系数, P 为显著性水平

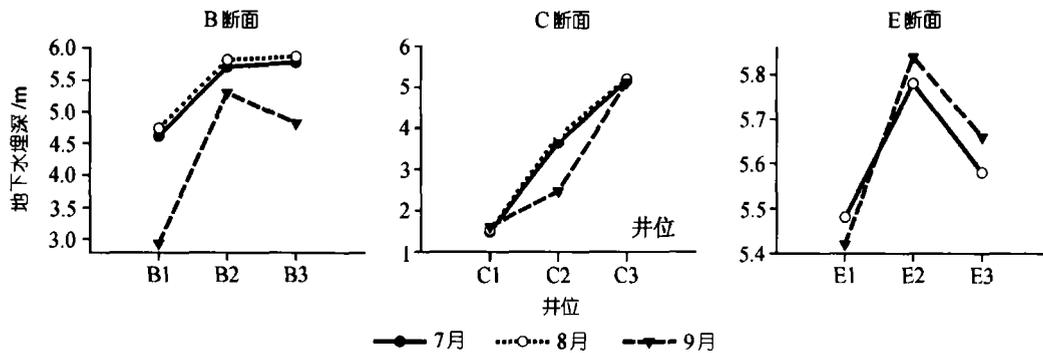


图2 三断面7,8和9月地下水埋深

(2) 土壤盐分对胡杨叶水势的影响. 图3为B, C和E断面B2, C1, C2, C3和E2井位处土壤电导率、总盐与胡杨叶水势变化趋势图. 从图3可以直观地看出, 距地表50~100 cm深度处土壤总盐和电导率与胡杨叶水势之间存在较显著的负相关关系, 相关分析后发现, 它们之间的偏相关系数超过-0.6(表5); 距地表100~200 cm处土壤总盐和电导率与胡杨叶水势之间存在不确定关系. 在C1和C2井位处胡杨叶水势与土壤总盐和电导率变化趋势相反, 胡杨叶水势最高值出现在C1井位处, 而此时土壤总盐和电导率位于波谷处. 这是因为土壤盐分对胡杨叶水势及胡杨生长造成的影响视输水前土壤水分状况而定. 在C1和C2井位处, 第6次输水后,

地下水埋深已抬升到4 m左右(表4), 土壤能供给胡杨生长所需的水分, 第7次输水后, 土壤溶液被稀释, 浓度减小, 土壤水势增高, 胡杨叶水势也随之增高, 它与土壤盐分变化趋势相反. C2井位处, 土壤盐分虽然最高, 但胡杨叶水势却不是最低, 这与该井位处地下水埋深较小(3.15 m)、土壤水势较高有关. 在B2, C3和E2井位处胡杨叶水势与距地表100~200 cm处土壤总盐和电导率变化趋势相同, 在E2井位处胡杨叶水势最低, 而土壤总盐和电导率也位于波谷处. 对于B2, C3和E2井, 第6次输水后, 地下水埋深超过5 m, 胡杨生长受到水分胁迫, 第7次输水后B2井地下水埋深抬升幅度较大, 距地表100~150 cm处土壤盐分明显增大, 土壤

水势与原来土体相比明显增高, 胡杨叶水势也增高; C3 和 E2 井输水后地下水埋深抬升幅度不大, 土壤盐分没有明显增大, 土壤水势依然很小, 没有足够的水分供给胡杨叶片的蒸腾耗水, 所以, 胡杨叶片只有保持较低的水势才能增强对周围环境的吸水能力。

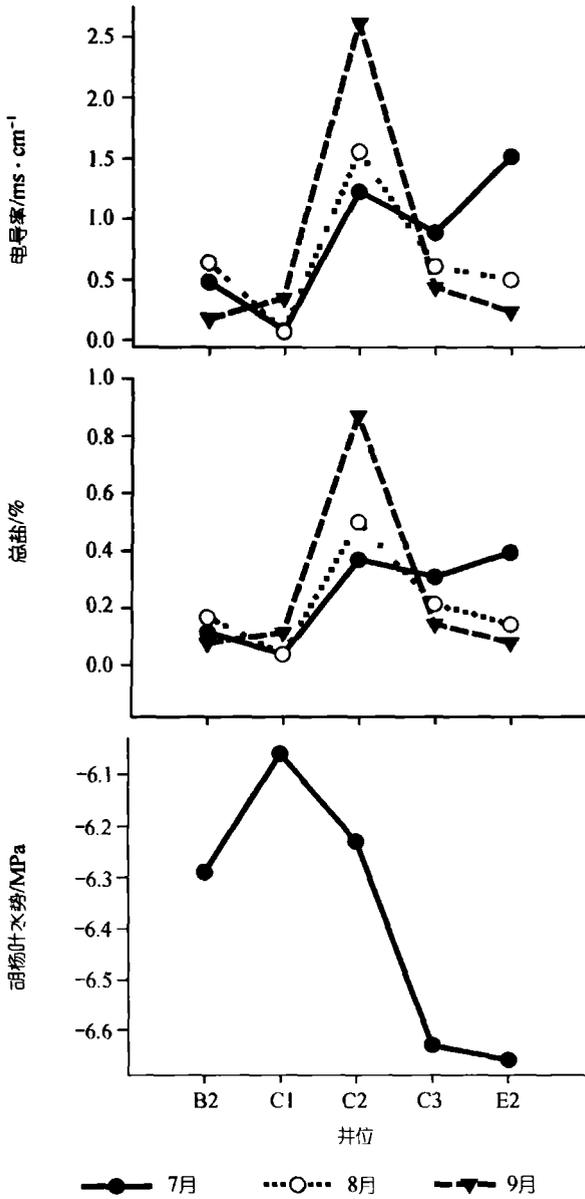


图 3 不同断面土壤盐分与胡杨叶水势变化

表 5 胡杨叶水势与土壤盐分偏相关系数

距地表深度/cm	特征 ^{a)}	电导率/ $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$	总盐/%
50~100	R	-0.698	-0.703
	P	0.190	0.186
100~150	R	0.002	0.012
	P	0.997	0.985
150~200	R	0.295	0.300
	P	0.630	0.623

a) R 为偏相关系数, P 为显著性水平

2.3 胡杨水势变化指示的环境与生态意义

上述分析表明, E 断面的胡杨所受的干旱胁迫程度也比 B 和 C 断面强, 该断面胡杨叶水势也最低. 但是, E 断面胡杨叶水势与 B 断面相比, 差幅不大, 仅为 0.2 MPa. 这说明在经过 7 次输水后, E 断面的干旱状况在逐渐好转, 胡杨所受的干旱胁迫强度在逐渐减轻. 对于 C 断面, 生态输水后, 地下水埋深小于 B 和 E 断面, 胡杨叶水势最高, 胡杨所受的干旱胁迫强度小于 B 和 E 断面.

从土壤盐分分析结果可见, 距地表 50~100 cm 处土壤盐分对胡杨叶水势的影响最大, 且呈负面影响 (表 4). 从 B 到 E 断面, 该深度土壤盐分逐渐增大, 胡杨叶水势逐渐降低, 说明纵向上距离大西海子水库越远, 胡杨所受的盐胁迫强度越大. 从 C 断面不同井位来看, C1 井附近 50~100 cm 深度处土壤盐分最低, 胡杨叶水势最高; C3 井附近土壤盐分最高, 胡杨叶水势最低 (图 3). 这表明横向上距河道主轴线越远, 胡杨所受的盐胁迫强度越大.

在塔里木河下游极端干旱区, 地下水是维系天然植被生存的最重要的环境因子. 研究表明, 当地下水埋深小于 4.5 m 时, 胡杨体内脯氨酸含量较低, 胡杨生长不受水分胁迫^[18,19], 胡杨处于相对健康状态; 当地下水埋深大于 4.5 m 时, 胡杨体内脯氨酸含量增多^[18], 胡杨生长受到水分胁迫, 胡杨处于相对不健康状态. B 和 E 断面地下水埋深普遍大于 4.5 m, 胡杨所含脯氨酸含量较多, 胡杨叶水势较低, 平均达 -6.64 MPa, 此时, 胡杨已受到水分胁迫, 处于不健康状态. C 断面地下水埋深普遍小于 4.5 m, 胡杨叶水势较高, 平均达 -6.21 MPa, 此时, 胡杨不受水分胁迫, 胡杨群落处于相对健康状态. 为此, 结合对胡杨体内脯氨酸含量的分析, 提出 -6.5 MPa 是判断胡杨生长是否遭受水分胁迫的一个重要水势值.

3 结论与讨论

在极端干旱的塔里木河下游, 胡杨生长所需的水分主要由地下水供给, 地下水埋深对胡杨的生存、生长和发育起着十分重要的作用. 当地下水埋深大于 9 m 时, 胡杨生存受到威胁, 处于死亡边缘; 当地下水埋深大于 4.42 m 时, 胡杨的生长和发育遭受胁迫. 胡杨叶水势可以反映胡杨所受的干旱胁迫强度, 胡杨叶水势越低, 表明胡杨受干旱胁迫强度越大. 地下水埋深与胡杨叶水势呈显著的负相关关系, 当地下水埋深较浅时, 胡杨才能保持较高的叶水势, 增强

胡杨叶片的蒸腾和光合作用。

在通常状况下,土壤盐分可以通过降低胡杨叶水势来减小胡杨的生长速率。由于距地表 50~100 cm 深度处土壤盐分对胡杨叶水势的影响最大,是土壤盐分影响胡杨生长的敏感深度,因此,保持该深度较低的土壤盐分对胡杨生长较为有利。对于纵向上距大西海子水库较远的断面和横向上距河道主轴较远的井位来说,同样,只有保持较低的土壤盐分,才能确保胡杨不受盐分胁迫。然而,在塔里木河下游极端干旱区,降低土壤盐分的惟一有效途径只有生态输水。

塔里木河下游由于河道长期断流,地下水埋深大幅度下降,加之降水极少,气候干燥,蒸发力强,土体干燥,输水后,土壤中大量的固体盐分被溶解,土壤盐分增大。从局部来看,由于地下水埋深不同,土壤水盐状况各异,对胡杨生长造成的影响也不尽相同。研究发现,在输水过程中,土壤盐分对胡杨叶水势变化影响与输水前土壤水分状况密切相关。如果输水前土壤水分能供给胡杨生长,输水后,土壤溶液被稀释,土壤盐分下降,土壤水势增高,胡杨叶水势也增高。如果输水前土壤没有足够的水分供给胡杨生长,输水后,若地下水埋深抬升幅度不大,土壤中只有极少量的可溶性固体盐分被溶解,土壤盐分没有明显增大,土壤水势依然很小,胡杨叶水势也很低;若地下水埋深抬升幅度较大,土壤盐分明显增大,土壤水势与原来土体相比明显增高,胡杨叶水势也增高;实际上,输水后,不论土壤盐分是增大还是减小,土壤水势都会增高,胡杨叶水势也增高,土壤盐分对土壤水势没有较明显的影响。但是,当地下水位抬升到 4.5 m 以上时,胡杨生长不受水分胁迫,这时输水后土壤盐分的高低可以反映土壤水势的大小。

致谢 本工作为中国科学院知识创新工程“塔里木河流域水资源利用殖民地综合管理试验示范研究”、国家自然科学基金项目(批准号:90502004,30500081)资助。

参 考 文 献

- 徐海量,宋郁东,王强.胡杨生理指标对塔里木河下游生态输水的响应.环境科学研究,2003,16(4):24—27
- 陈亚鹏,陈亚宁,李卫红.新疆塔里木河下游生态输水对胡杨叶片 MDA 含量的影响.应用与环境生物学报,2004,10(4):408—411
- 陈亚鹏,陈亚宁,李卫红.干旱胁迫下的胡杨脯氨酸累积特点分析.干旱区地理,2003,26(4):420—424
- Sykes S R. The inhet stance of salt exclusion in woody perennial fruit species. Plant and Soil, 1992, 146: 23—129
- Greenway H M, Unns R M. Echanism of salt tolerance in non-halophytes. Ann Rev Plant Physio, 1980, 31: 149—190
- 刘建平,李志军,何良荣.胡杨、灰叶胡杨种子萌发期抗盐性的研究.林业科学,2004,40(2):165—169
- 王东,陈其凌,李铭,等.胡杨不同生长阶段的耐盐性.新疆林业,1998,(4):9—10
- 马焕成,王沙生.胡杨膜系统的盐稳定性及盐胁迫下的代谢调节.西南林学院学报,1998,18(1):15—23.4
- Mrema A F, Granhall U. Sennerby-Forsse plant growth, leaf water potential, nitrogenase activity and nodule anatomy in *Leucaena leucocephala* as affected by water stress and nitrogen availability. Trees-Structure and Function, 1997, 12(1): 42—48
- Chen Yaning, Li Weihong, Chen Yapeng. Physiological response of natural plants to the change of groundwater level in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang. Progress in Natural Science, 2004, 14(11): 975—983
- Morte A, Lovisolo C, Schubert A. Effect of drought stress on growth and water relations of the mycorrhizal association *Helianthemum almeriense*-*Terfezia clavaryi*. Mycorrhiza, 2000, 10: 115—119
- Donovan L A, GriseÂ D J, West J B, et al. Predawn disequilibrium between plant and soil water potentials in two cold-desert Shrubs. Oecologia, 1999, 120: 209—217
- 李新,杨德刚.塔里木河水资源利用的效益与生态损失.干旱区地理,2001,24(4):327—331
- 陈亚宁,崔旺成,李卫红,等.塔里木河的水资源利用与生态保护.地理学报,2003,58(2):215—177
- 陈亚宁,李卫红,徐海量,等.塔里木河下游地下水埋深对植被的影响.地理学报,2003,58(2):542—549
- 宋郁东,樊自立.中国塔里木河水资源与生态问题研究.乌鲁木齐:新疆人民出版社,2000
- 郭英杰,许英勤,马彦华.新疆塔里木河下游应急输水的生态效益.干旱区地理,2002,25(3):237—240
- 陈亚宁,陈亚鹏,李卫红,等.塔里木河下游胡杨脯氨酸累积对地下水位变化的响应.科学通报,2003,48(9):958—961
- Ya-Ning Chen, Qiang Wang, Xiao Ruan, et al. Physiological Response of *Populus euphratica* to Artificial Water-recharge of the Lower Reaches of Tarim River. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(12): 1393—1401

(2005-07-22 收稿,2006-01-23 收修改稿)