植被生理生态学数据表征的合理地下水位研究
——以塔里木河下游生态恢复过程为例

陈亚宁① 王 强② 李卫红① 阮 晓② 陈亚鹏① 张丽华①
(①中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; ②浙江大学宁波理工学院, 宁波 315100. E-mail: chengn@ms.xjb.ac.cn)

摘要 结合对塔里木河下游不同断面地下水位变化和植物生理生态特性的分析测试, 研究了塔里木河下游主要建群种胡杨和柽柳在不同地下水位条件下的生理响应和适应性, 探讨了塔里木河下游干旱环境下胡杨、柽柳的合理生态水位问题. 研究结果表明, 胡杨和柽柳叶片的可溶性糖、游离脯氨酸、内源植物激素脱落酸以及细胞分裂素浓度等与地下水位埋深有着密切的关系. 随地下水位埋深加大和植物受到的生理胁迫加强, 植物叶片的细胞分裂素浓度逐渐减少, 而可溶性糖、游离脯氨酸和脱落酸含量增加, 在距河道最远处(500 m)达到最高值; 比较胡杨、柽柳对不同断面地下水位变化的响应可见, 在地下水位埋深较浅的亚合浦马汗断面, 胡杨、柽柳的各项生理指标变化较小, 而在地下水位埋深较大的依干不及麻断面, 随地下水位埋深加大, 可溶性糖和内源植物激素脱落酸含量呈线性关系增加, 其中游离脯氨酸含量在距河道300 m处出现异常积累, 反映了植物生理受到强烈胁迫; 同时还发现, 在一定强度的水分胁迫下, 柽柳的生理过程较胡杨强烈, 对地下水位埋深变化更为敏感, 胡杨的抗旱性较之为强; 结合样地调查结果, 推测塔里木河下游胡杨、柽柳的合理生态水位埋深在4 m以内, 9 m以下为胡杨和柽柳死亡的临界地下水位.

关键词 内陆河流 地下水位埋深 植物生理响应 合理地下水位 塔里木河

干旱区内陆河流域的水文过程控制着生态过程, 与生态系统的稳定性有着密切的联系. 天然植被作为生态系统的主要生产者, 是干旱区生物生态系统中最主要的组成部分, 在抑制荒漠化过程和保护生物多样性等方面有着重要的生态意义. 然而, 干旱区生物过程微弱, 生物生态系统规模小、稳定性低, 植物的生存与生长发育主要依赖于地下水和地表水. 而在一些内陆河下游无地表水补给的断流河道, 地下水则成为维系天然植物生长的惟一水源. 地下水位变化直接影响着植物的生长和衰败, 控制着植物群落的演变与组成[1~3], 是干旱区最关键的生态因子, 影响着干旱区内陆河流域生态系统的构成、发展和稳定.

然而, 干旱区地下水位变化与植被演变之间有着复杂的关系, 合理地下水位的确定涉及到地下水、土壤、植被等相互之间的动态平衡. 在干旱环境强烈蒸发作用下, 地下水位过高, 会因蒸发而无效耗散, 并导致土壤发生盐渍化, 对植物产生盐胁迫; 地下水位过低, 植物生长则因受到水分胁迫而生命活动受到抑制, 出现退化甚至死亡, 导致地表荒漠化. 只有当地下水位埋深处于合理生态水位时, 植被能够正常生长, 这时其他生态因子对植物生长的影响不大[4]. 但确定既不因为地下水位过高而造成土壤返盐, 又能够维持干旱内陆河流域非地带性自然植被生长的合理生态水位, 则需要研究地下水及土壤环境与植被生长之间的相互关系, 了解现有植被物种对地下水位变化的适应机制, 分析植物的生理生态特性变化和植物群落的演替规律. 国内外不少学者围绕水资源总量、水资源补给与消耗等, 从水文地质或景观生态学等学科方向入手, 对地下水在环境中的生态调控作用或对植被变化的影响进行过研究[5], 探讨地下水资源管理与植被的生存关系以及荒漠植被生长的最佳水文地质环境等[6,7]. 近些年, 一些学者开始从植物生理、生态角度研究不同植物的水分利用效率和对水分亏缺的生理响应过程, 分析植物生理过程对水、盐环境条件变化的适应机制, 探讨地下水位变化对植物生长的影响. 研究结果发现[8~10], 随地下水位埋深加大, 植物生长速率将趋于减缓, 胡杨叶片的脯氨酸含量迅速积累, 柽柳植株的气孔导度降低, 在地下水位低于3 m时, 柽柳的气体交换受到影响, 植物冠层面积减小. Horton[11]针对植物在不同地下水位埋深的生理反应进行了研究, 提出了植物进行光合等生理作用的地下水位埋深阈值. 所有这些研究在解

析地下水位与植被间相互关系方面取得了重要突破，但涉及天然植物生长发育和生态保育恢复的合理生态水位等科学问题尚不甚深入，有待进一步研究.

塔里木河地处中国西北干旱区，全长 1321 km，是中国最长的内陆河. 生态环境极为脆弱，水资源开发过程中的生态与经济的矛盾十分突出，是中国典型的内陆河流域生态脆弱区. 在过去的 50 年里，塔里木河在以水资源开发利用为核心的大强度人类经济、社会活动的作用下，流域自然生态过程发生了显著变化，塔里木河下游河道断流，河流尾闾湖泊——罗布泊和台特玛湖分别于 1970 和 1972 年干涸，地下水位下降至 8~12 m，由地下水维系的天然植被极度退化. 以芦苇、罗布麻、骆驼刺等为主的草本植物大片死亡，柽柳、胡杨大面积衰败，风蚀沙化加剧，土地荒漠化过程加强，生物多样性严重受损. 为了遏制塔里木河下游生态环境日趋劣变的态势，拯救塔里木河下游濒临消亡的"绿色走廊"，从 2000 年开始，国家实施了向塔里木河下游生态输水工程，旨在通过沿河道输水，抬升河道两岸的地下水位，以挽救日益衰败的天然植被. 然而，由于干旱区水资源非常珍贵，因此，为合理有效地利用水资源，在向塔里木河下游实施生态输水过程中，必须了解输水对地下水位抬升的影响以及地下水位抬升至多高方能对天然植物的生长恢复产生效应，回答维系塔里木河下游生态安全的合理生态水位等相关问题. 本文结合 2000 年以来对塔里木河下游生态输水过程中对地下水变化的动态监测以及植物生理生态特性测试资料的分析，通过研究天然植被对地下水位变化的响应过程和适应机理，探讨维持塔里木河下游天然植被生长发育的合理生态水位，为干旱内陆河流域受损生态系统的恢复重建提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区梗概

研究区位于塔里木河下游的大西海子水库至台特玛湖区段，地势起伏和缓，北高南低，河道呈东南走向穿行于塔克拉玛干沙漠与库鲁克沙漠之间狭窄的冲积平原上，浅层地下水主要由河水下渗补给. 这里气候干燥，多风沙天气，年平均降水量在 17.4 ~ 42.0 mm 之间，而平均年蒸发力高达 2500~3000 mm，是中国最干旱地区之一；1972 年大西海子水库的修建，拦截了塔里木河，致使塔里木河下游 321km 河道彻底断流，地下水位大幅度下降，塔里木河下游大部分地区的地下水位都下降到 8~12 m，地表沙漠化过程强烈；植物种类少，植被覆盖度低，处于严重衰败状态. 乔木主要有胡杨(*Populus euphratica*)、灌木有柽柳(*Tamarix* spp.)、白刺(*Nitraria sibirica*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)，其中多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、刚毛柽柳(*Tamarix hispida*)、长穗柽柳(*Tamarix elongata*)等是构成柽柳灌丛的优势种. 草本植物主要有芦苇(*Phragmites communis*)、罗布麻(*Poacynum hendersonii*)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、甘草(*Glyzyrrhiza inflata*)、花花柴(*Karelinia caspica*)等. 近 30 年来由于河道断流，无地表径流补给，天然植被大面积死亡，生态系统严重受损，成为中国西北地区生态环境问题最为突出的地域之一.

1.2 地下水动态监测

为了了解塔里木河下游输水过程中地下水位的变化状况，自 2000 年以来，沿塔里木河下游输水河道——齐文阔尔河建立地下水监测断面 9 个(图 1)，每个断面间距约 20 km，由大西海子水库以下，分别是阿克墩(A)、亚合甫马汗(B)、英苏(C)、阿布达勒(D)、喀尔达依(E)、吐格买来(F)以及阿拉干(G)、依干不及麻(H)和考干(I)等 9 个断面. 其中，后 3 个断面的间距为 45 km. 并在横向上，在每个断面，间隔 100 m 或 200 m 布设一眼地下水位监测井(井深 8~17 m)，共布设地下水监测井 40 眼，监测在向塔里木河下游输水过程中各区段地下水位、水盐动态变化以及对地下水位影响范围. 监测频率为每月一次，输水过程中，增加监测次数.

1.3 植物样地调查

调查的目的是为了解不同环境梯度下植被变化. 调查区域选择塔里木河下游的上游段亚合甫马汗、中游段阿拉干和下游段依干不及麻 3 个典型断面. 考虑到塔里木河下游荒漠植被发生过程的唯水性和长期亏水性，宏观上虽然荒漠植被呈带状. 但局地常常是低密度，斑块状分布，同时还有连片的植被死亡，因此，很难用连续的群落调查结果来反映植物对输水的响应效果. 再者，由于目前采取的沿自然河道"线形"输水过程，没有大规模洪水漫溢过程，不存在植物依托水过程而发生的落种更新现象，因此，也不涉及植被发生的调查. 为此，在每个观测断面上，结合地下水位监测井的布局和植物生长状况，从河边开

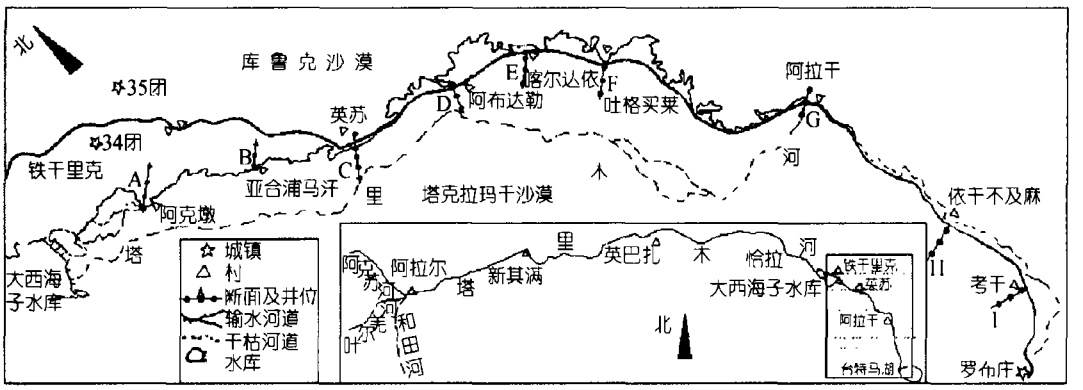


图 1　新疆塔里木河下游 9 个监测断面布局示意图

始设置了 5 个样地, 分别在距河道 100, 200, 300, 400 和 500 m 处采集样品. 并以 GPS 进行定位, 记录每个样地的海拔高度、经纬度及各样地的地下水位埋深等.

1.4　植物生理特性测试

植物材料. 本文是以塔里木河下游主要建群种胡杨和柽柳为研究材料. 输水前植物样本采集于 2000 年 7 月 1~20 日, 输水后每年于 7 月 1~20 日采集样品. 在各样地的采样过程中, 挑选树龄长势接近且健康无病虫害的植株各 10~15 株为研究样本, 样本采集的同时作标记, 每株采集朝南接受充足光照的叶片或同化枝 20~30 片进行检测分析.

叶片脯氨酸分析. 脯氨酸含量测定参照 Troll and Lindsley (1955) 方法. 植物材料 3 % aqueous sulfosalicylic acid 溶液匀浆, 8000 g 离心 10 min, 上清液用于测定脯氨酸含量. 反应混合液中加入 0.2 mL 离心上清液, 2 mL 水合茚三酮, 2 mL 冰乙酸, 100℃沸水浴中反应 1 h, 冰浴终止反应, 混和液 4 mL 甲苯萃取, 520 nm 测定吸收度.

可溶性糖分析. 冻干叶片(50 mg)1 mL 80% (v/v) 乙醇磨碎抽提, 加入已知含量核糖醇作为内标. 提取液煮沸 15 min, 10000 g 离心 5 min, 同上步骤提取 2 次, 合并上清液. 45℃真空干燥, 1.0 mL 蒸馏水溶解, 离子交换色谱 Sephadex QAE-A-25 (Pharmacia Biotech, Sweden)纯化. 洗脱液(1.0 mL 提取液+2.0 mL 水洗液)真空干燥, 300 μL 蒸馏水溶解. HPLC 法分析, 柱 300 mm×7.8 mm (carbohydrate-H^+, HYDERSIL, UK), 柱温 35℃, 流动相 H_2SO_4 0.005 mol/L, 流速 0.6 mL/min.

植物激素提取和 HPLC 定量. 植物液片(0.5 g)液氮中磨碎, 250 μL 甲醇 4℃震荡过夜, 12000 g 离心 10 min, 上清 40℃真空干燥, 30 μL 10 % CH_3CN 溶解. 提取液 HPLC 法定量分析, 检测器 LC-10A TVP photodiode and ray detector (PDA), 柱 Shim pack CLC-C_8 (0.15m×6.0φ), 流速 1.5 mL·min^{-1}, 检测波长 250 nm; A 泵流动相 10 % CH_3CN (CF_3COOH 调节 pH = 3.0), B 泵 60% CH_3CN; 脱落酸(ABA)和细胞分裂素(CTK)标准物质购于 Aldrich 公司, 外标法峰鉴定和定量.

2　结果分析

2.1　地下水位变化分析

自 20 世纪 70 年代大西海子水库修建后, 塔里木河下游长期断流, 在 2000 年向塔里木河下游输水前, 塔里木河下游大部分地域的地下水位已下降到 7 m 以下, 并表现为由上游至下游, 随河道断流时间增加, 地下水位埋深加大的变化趋势; 自 2000 年向塔里木河下游输水至 2004 年, 已连续 5 年向塔里木河下游断流河道实施间歇性输水, 输水量达 19×10^8 m^3, 由各断面监测井实测数据可见(图 2), 河道附近地下水位明显抬升, 在靠近大西海子水库的亚合浦马汗断面和阿布达勒断面抬升幅度较大, 地下水位分别由 2000 年的 6.21 和 7.27 m, 上升至 2002 年的 3.25 和 3.09 m 以及 2004 年的 3.24 和 3.73 m; 中游段的喀尔达依和阿拉干断面, 地下水位抬升也较大, 尤其喀尔达依断面, 与 2000 年相比, 2002 年和 2004 年, 地下水位分别抬升了 48.34%和 42.58%; 下游段的依干不及麻断面分别抬升了 29.86%和 46.79%. 横向上, 各断面

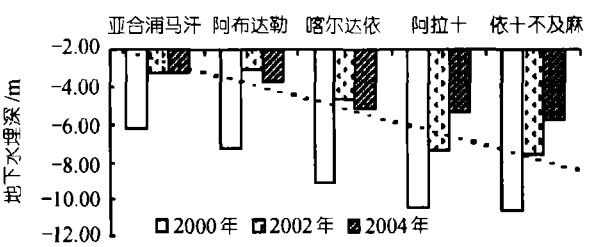


图 2　塔里木河下游典型断面地下水位变化

地下水位埋深均表现为随远离输水河槽中轴线而加大. 在塔里木河下游上游段的亚合浦马汗断面和阿布达勒断面影响范围较宽, 达800~1000m左右, 而在塔里木河下游的中游段和下游段, 受输水量和输水时间的影响, 横向影响范围不及上游段[12].

2.2 植物生理响应和适应性分析

(1) 可溶性糖和脯氨酸含量变化. 可溶性糖和游离脯氨酸是植物中的主要渗透调节物质, 当植株生长受到水分胁迫时, 往往通过可溶性糖和游离脯氨酸的积累来降低植物组织的渗透势, 以提高细胞原生质浓度, 增强植物抗胁迫能力[13~15]. 对塔里木河下游不同地下水位条件下的胡杨和柽柳可溶性糖和脯氨酸含量的变化分析可见(图 3, 4), 纵向上, 胡杨和柽柳可溶性糖和脯氨酸含量均以地下水位埋深较大的依干不及麻断面为高; 横向上, 各断面均表现为随着远离河道, 地下水位埋深加大, 可溶性糖和脯氨酸含量增加. 其中, 胡杨叶片可溶性糖含量最高值分别出现在阿拉干和依干不及麻样地距河床 500 m 的样地, 为414.82 mg/g(DW)和426.73 mg/g(DW), 脯氨酸浓度最高值分别出现在阿拉干和依干布及麻断面距河床400和500 m的样地, 分别为17.57~19.32 μg/g (DW)和 19.35~24.28 μg/g (DW); 柽柳可溶性糖的浓度在距河道100~300 m的样地积累较快, 在距河道300 m处为最高点. 脯氨酸含量在亚哈甫马汗断面变化幅度较小, 而在阿拉干和依干不及麻断面变化显著, 尤其在距河道300 m以外的样地, 呈现出迅速积累现象.

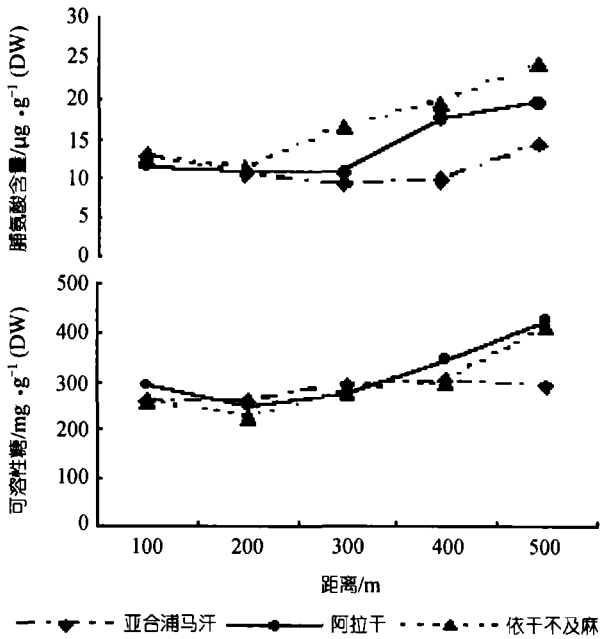


图 3 不同断面胡杨叶片可溶性糖和脯氨酸含量变化

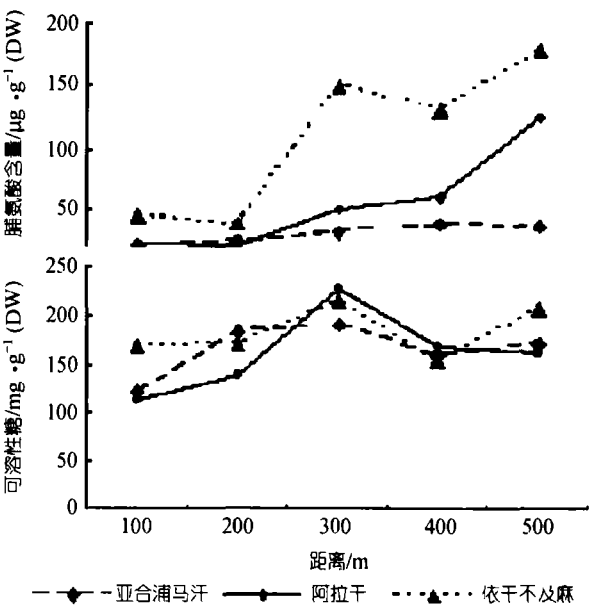


图 4 不同断面柽柳的可溶性糖和脯氨酸含量变化

(2) 植物激素浓度变化. 植物激素参与土壤和根吸水状况的信息传导过程. 在干旱胁迫环境下, 内源植物激素脱落酸(ABA)的浓度水平会增加, 以降低气孔导度[16~18], 减少植物水分散失. 同时, 细胞分裂素(CTK)也参与植物对干旱胁迫的调控, CTK 供给的减少是根部受到胁迫的敏感信号[19]. 本文 ABA 和 CTK 数据从2004年7月1~20日采集样品中分析获得, 每个断面所获数据为10次测量的平均值, 每次测量设置3个重复. 对不同断面胡杨叶片内 ABA 和 CTK 含量变化分析可见(图5), 随地下水位埋深加大, 胡杨叶片的 ABA 含量明显增加. 在距河道500 m处最大, 而CTK含量呈逐渐减少态势, 在距河道 500 m 处最小, 其中, 在亚合浦马汗和阿拉干断面 100~300 m 区段内, 胡杨叶片的 ABA 和 CTK 含量变化不明显, 而在 300 m 以后发生显著变化. 在下游段的依干不及麻断面, 胡杨叶片的 ABA 和 CTK 含量变化最为明显, 比较100和500 m处的含量变化, 胡杨叶片的 ABA 含量增加了2.8倍, CTK 含量减少了4倍; 柽柳的 ABA 含量变化特点与胡杨存在相似特点, 在各断面也均表现出随距河道距离的增加, 地下水位埋深加大而增加的趋势, 各断面的最高值均出现在距河道 500 m 的样地(图 6). 其中, 位于下游段的依干不及麻断面的 ABA 含量最高, 达到38.09 ng/g(Fw).

2.3 植被生存的合理生态水位分析

塔里木河下游的植被主要是非地带性中旱生植物, 在无地表径流的条件下, 地下水和土壤水分则是维系塔里木河下游胡杨、柽柳等天然植物生存的主要

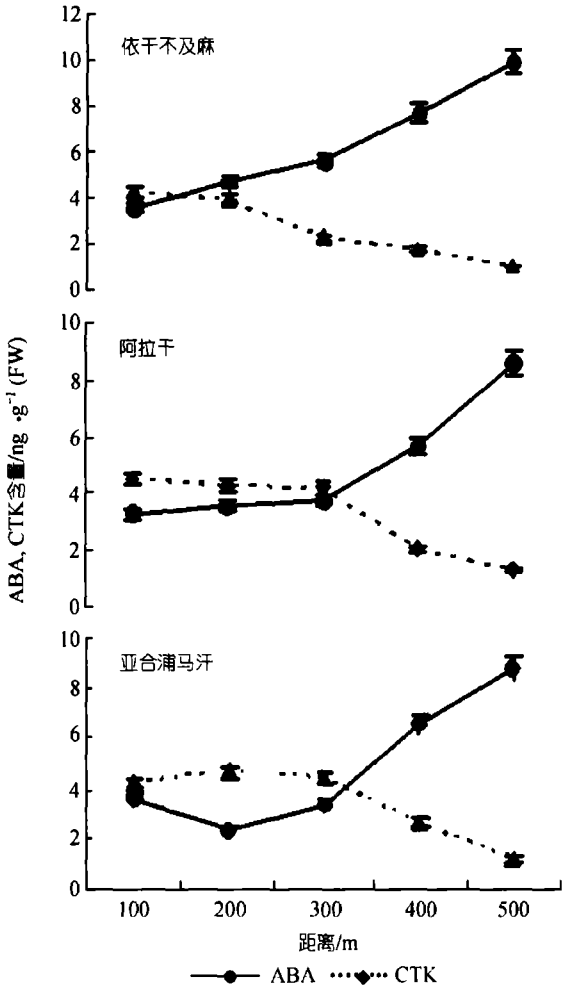


图5 不同断面胡杨叶片激素含量变化

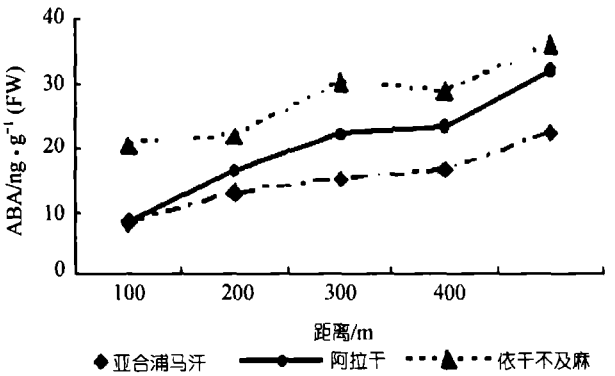


图6 不同断面柽柳ABA含量变化

水源. 因此, 研究塔里木河下游地区天然植被生存的生态水位和胁迫地下水位, 对于确定维系塔里木河下游生态安全的最低需水量问题具有重要意义. 这里我们把能够维持天然植被生长所需水分的地下水位埋深, 称作生态地下水位, 而把植物生长受到干旱胁迫的地下水位埋深, 称作胁迫地下水位. 由于塔里木河下游长期断流, 地下水位持续下降, 天然植物处于严重衰败状态, 以胡杨、柽柳等为主体的天然植物生长已受到不同程度的干旱胁迫. 胡杨、柽柳生理指标的变化清楚地表达了这一特点, 对解读胡杨、柽柳生存的生态(胁迫)地下水位问题有着重要的指示意义.

(1) 胡杨. 可溶性糖与游离脯氨酸含量的积累是水分胁迫的重要信号. 在水分胁迫下, 可溶性糖与脯氨酸对植物叶片渗透调节有着重要的意义[20], 它们通过可溶性有机溶剂的合成来增强细胞的渗透势, 从而保持组织稳定的水分状态. 从可溶性糖和游离脯氨酸分析数据看, 当地下水位埋深增加时, 胡杨的生理胁迫明显加大, 细胞中可溶性溶剂的浓度改变, 游离脯氨酸生物合成发生变化, 其中包括水解蛋白和参与氧化降解过程的蛋白[21,22]. 由图3可见, 在不同地下水位梯度下, 胡杨的生理反应表现不同, 并与地下水位变化有着密切的关系. 在亚合甫马汗断面100~300 m样地, 当地下水位埋深在4 m以内时, 胡杨的生理特性变化不甚明显, 胡杨叶片的可溶性糖和脯氨酸含量变化较为和缓, 可溶性糖为224.71 mmol/L、游离脯氨酸为9.28~11.06 mmol/L, 表明胡杨受到的胁迫程度最低, 其生长处于正常状态. 在阿拉干和依干不及麻断面距河道300 m以远的样地, 当地下水位埋深增加时, 胡杨叶片可溶性糖和脯氨酸含量明显升高, 胡杨叶片的脯氨酸含量出现了迅速积累现象. 在依干不及麻断面的300 m处样地, 当地下水位埋深达到9 m以下时, 水分胁迫导致游离脯氨酸含量异常累积, 由11.28 mmol/L增加到16.28 mmol/L, 在阿拉干断面400 m处, 游离脯氨酸含量由10.72 mmol/L增加到17.57 mmol/L, 胡杨已受到强度水分胁迫. Horton等[9]的研究也表明, 当地下水位埋深在4 m以内时, 胡杨黎明前的水势没有发生明显变化. 而当地下水位埋深达到约9 m的时候, 水的有效性降低, 胡杨的水势则发生明显变化.

植物激素和细胞分裂素参与植物对干旱胁迫的调控, 作为对水亏损的反应, 植物细胞内源ABA的浓度水平将会增加, 而CTK的浓度减少[23], 从而导致植物气孔导度降低, 减少植物水分散失. 由图5可见, 在亚合甫马汗断面100~300 m样地, 当地下水位埋深在4 m以内时, 胡杨叶片的内源植物激素脱落酸(ABA)浓度和细胞分裂素(CTK)的含量没有明显变化, 而当地下水位埋深达超过4m以下时, ABA的浓度明显增加, 而CTK的含量急剧减少(见图5), 表达了胡

杨生长受到干旱胁迫，并且在下游段的依干不及麻断面，由于地下水位埋深较大，胡杨叶片的 ABA 和 CTK 浓度变化是否明显，表明受到的胁迫程度加强.

(2) 柽柳. 柽柳作为塔里木河下游主要灌木植被，是塔里木河流域天然植被主要建群种之一，对维持塔里木河下游环境脆弱区的生态平衡具有非常重要的生态作用. 对柽柳的研究表明，当存在较高频率的地表灌溉时，柽柳为响应地表水的灌溉，则以发育浅根系为主，这时更多依赖的不是地下水，其根系对土壤变干的反应迟缓[24]. 而当长期缺乏地表水时，地下水则对柽柳的生存直接产生影响[8]. 由图 3 可以看出，塔里木河下游由于长期断流无地表径流，受地下水位的影响，柽柳表现出与胡杨基本相似的生理响应. 然而，由于柽柳中渗透性活性物质的浓度高于胡杨，决定了柽柳可以承受更低的叶片水势(柽柳和胡杨体内大约分别有 2400 和 1700 $\mu mol \cdot g^{-1}$ 干物质)，从而使得柽柳在较低的叶片水势时能维持积极的细胞组织膨压和较高的气孔导度[25]，以提高细胞原生质浓度，增强其抗胁迫能力. 从柽柳的可溶性糖含量变化可见，在地下水位不断下降的过程中，呈逐步上升趋势，在距离河道 300m 处达到最大值，自此以后出现波动状态. 脯氨酸含量变化也同样表现为在亚哈甫马汗断面较小，其中在距离河道 200 m 以内范围，柽柳脯氨酸含量几乎没有对水位变化做出明显响应，说明当地下水位小于 5 m 时，对柽柳来说是适宜的. 在中下游段的阿拉干和依干不及麻断面，在距河道 300 m 处，柽柳叶片的脯氨酸含量变化显著，在地下水位埋深达到 9 m 左右时(距河道 300 m)，脯氨酸含量出现迅速积累现象(图 4)，表达了柽柳对干旱胁迫的强烈反应，表明柽柳已受到严重水分胁迫，处于临界死亡状态.

3 讨论与结论

植物生长在受到干旱胁迫时能够主动积累渗透调节物质，降低渗透势，以此维持细胞的膨压，进而使植株个体能进行正常代谢，这是植物对干旱胁迫的主动适应机制和生理响应. 然而，不同植物的干旱性具有明显差异，比较分析胡杨和柽柳的生理变化发现，在相同水分胁迫条件下，柽柳叶片的脯氨酸积累量比胡杨多，在地下水位变化过程中，柽柳叶片脯氨酸含量的增加过程比胡杨发生得快，表明柽柳对地下水位埋深变化更敏感，而胡杨的抗旱性较之为强.

胡杨和柽柳的内源植物激素脱落酸和细胞分裂素含量随地下水位埋深加大而呈现出规律性的变化趋势，反映了与地下水位的密切关系. 在受干旱胁迫时，脱落酸浓度的增加和细胞分裂素含量的减少，可有效地降低气孔导度[18]，减少植物水分散失，增强抗胁迫能力. 然而，在促进植物体内同化物质的积累过程中，植物的生长速度则呈明显下降趋势[26].

胡杨和柽柳叶片的游离脯氨酸含量在地下水位达到 9 m 时出现异常积累，表达了水分胁迫对胡杨和柽柳的强烈影响. 结合近几年样地调查结果，我们推测塔里木河下游胡杨和柽柳生存的临界地下水位埋深应在 9 m 左右. 胡杨和柽柳生存的合理生态水位下限应分别在 4 和 5 m 以内，当地下水位埋深大于此值时，胡杨和柽柳的生长则受到水分胁迫.

自 2000 年向塔里木河下游输水以来，河道附近的地下水位已得到明显抬升，在塔里木河下游输水河道的上、中游段许多地方，地下水位抬升到了 2~4 m，这一水位基本能够满足该地区一些耐旱乔、灌木植物的生长. 然而，目前采取的沿河道“线形”输水方式，虽然对提升河道附近地下水位、拯救日益衰败的天然植被起到了积极作用，但难以实现胡杨、柽柳等植物的更新，林间沙地活化现象仍然存在，为此，应采取适当工程措施，逐步逐段实施河水漫溢工程，激活土壤种子库，为植物的落种更新提供条件，以扩大输水的生态效应，实现生态系统的可持续性.

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与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

1 邓伟，何岩. 论地下水对地表生态的作用. 地理科学，1993, 13(2): 161—168

2 陈荷生. 西北干旱区水资源开发引起环境变化识别. 中国沙漠，1987, 7(2): 1—11

3 马金珠，高前兆. 西北干旱区内陆河流域水资源系统与生态环境问题. 干旱区资源与环境，1997, 11(4): 15—21

4 张天曾. 中国干旱区水资源利用与生态环境. 自然资源，1981, 1: 62—67

5 Ma J Z, Qian J, Gao Q Z. The Groundwater evolution and its influence on the fragile ecology in the south Edge of Tarim Basin. Journal of Desert Research, 2000, 20(2): 145—149

6 Mahoney J M, Rood S B. Response of a hybrid poplar to water table decline in different substrates. Forest Ecology and Manage-

ment, 1992, 54: 141—156

7 Robbins B D, Bell S S. Dynamics of a subtidal seagrass landscape: seasonal and annual change in relation to water depth. Ecology, 2000, 81(5): 1193—1205

8 Gries D, Zeng F, Foetzki A, et al. Growth and water relations of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* on Taklamakan desert dunes in relation to depth to a permanent water table. Plant Cell & Environment, 2003, 26: 725—736

9 Horton J L, Kolb T E, Hart S C. Response of riparian trees to interannual variation in ground water depth in a semi-arid river basin. Plant Cell & Environment, 2001, 24(3): 293—304

10 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的响应. 科学通报, 2003, 48(9): 958—961

11 Horton J L. Physiological response to groundwater depth varies among species and with river flow regulation. Ecological Applications, 2001, 11(4): 1046—1059

12 陈亚宁, 张小雷, 祝向民, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析. 中国科学, D辑, 2004, 34(5): 475—482

13 Kameli A, Lösel D M. Contribution of carbohydrates and other solutes to osmotic adjustment in wheat leaves under water stress. J Plant Physiol, 1995, 145: 363—366

14 Rekika D, Nachit M M, Araus J L, et al. Effects of water deficit on photosynthetic rate and osmotic adjustment in tetraploid wheats. Photosynthetica, 1998, 35: 129—138

15 Mattioni C, Lacerenza N G, Troccoli A, et al. Water and salt stress-induced alterations in proline metabolism of Triticum durum seedlings. Physiol Plant, 1997, 101: 787—792

16 Correia M J, Pereira J S. The control of leaf conductance of white lupin by xylem ABA concentration decreases with the severity of water deficits. J Exp Bot, 1995, 46: 101—110

17 Dodd I C, Stikic R, Davies W J. Chemical regulation of gas exchange and growth of plants in drying soil in the field. J Exp Bot, 1996, 47: 1475—1490

18 Aguilar M L, Espadas F L, Coello J, et al. The role of abscisic acid in controlling leaf water loss, survival and growth of micropropagated Tagetes erecta plants when transferred directly to the field. J Exp Bot, 2000, 51: 1861—1866

19 Itai C, Vaadia Y. Kinetin like activity in root exudate of water stressed sunflower plants. Physiologia Plantarum, 1990, 18: 941—944

20 Elhaak M A, El-Din A S, Sammour R H. Response of Phragmites australis to water stress from flooding to drought. Pak J Bot, 1993, 25: 41—46

21 Dungey N O, Davies D D. Protein turnover in isolated barley leaf segments and the effect of stress. J Exp Bot, 1982, 33: 12—20

22 Rayapati P J, Stewart C R. Solubilization of a prolin dehydrogenase from maize (Zea mays) mitochondria. Plant Physiol, 1991, 95: 787—791

23 Masia A, Pitacco B L, Giulivo C. Hormonal responses to partial drying of the root system of *Helianthus annuus*. J Exp Bot, 1994, 45: 69—76

24 Busch D E, Ingraham N L, Smith S D. Water uptake in woody riparian phreatophytes of the Southwestern United States: a stable isotope study. Ecological Applications, 1992, 2: 450—459

25 Busch D E, Smith S D. Mechanisms associated with decline of woody species in riparian ecosystems of the southwest U.S. Ecological Monographs, 1995, 65: 347—370

26 李卫红, 陈亚鹏, 张宏锋, 等. 塔里木河下游断流河道应急输水与地表植被响应. 中国沙漠, 2004, 24(3): 301—305

(2005-07-20 收稿, 2006-01-16 收修改稿)