

绿洲—荒漠带植物物种多样性特征对水资源的响应^{*}周洪华^{1,2} 陈亚宁^{1,2**} 李卫红^{1,2}

1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院绿洲与荒漠环境重点实验室 乌鲁木齐 830011

摘要 结合野外调查, 采用物种丰富度指数(R)、Shannon-Wiener 指数(H)、Simpson 指数(D)、Pielou 均匀度指数(J_{sw})分析了塔里木河下游绿洲—荒漠带群落物种多样性特征, 并选用地下水埋深和0—20, 20—50, 50—80, 80—130 cm 土壤含水量作为植物生存的水环境指标, 分析了物种多样性指数对环境水资源的响应。结果表明: 塔里木河下游绿洲—荒漠带共发现 19 种植物, 多样性指数均较同温带其他植被类型低; 地下水埋深和 80 cm 以下深层土壤含水量共同影响群落物种多样性, 而且当地下水埋深较深时, 深层土壤含水量对群落物种多样性特征的影响作用甚至比地下水埋深大。同时, 研究还发现, < 4 m 是维持绿洲—荒漠群落物种多样性、保护绿洲稳定的植被合理地下水位, 9 m 是绿洲—荒漠带植被生存的极限水位。

关键词 塔里木河 绿洲荒漠过渡带 物种多样性 地下水埋深 土壤水分

绿洲荒漠过渡带指荒漠生态系统和绿洲生态系统之间的接触带, 属于典型的生态交错带。它是绿洲生态系统的重要组成部分, 对维持绿洲稳定具有重要作用^[1,2]。近年来绿洲荒漠过渡带的重要性得到了众多学者的高度重视, 绿洲荒漠过渡带的相关研究陆续展开。贾宝全研究了民勤绿洲荒漠过渡带的植被盖度, 沙丘密度和沙丘占地面积的变化, 分析了过渡带环境演变过程和机制^[2]; 何志斌等对过渡带优势植物泡泡刺, 红砂种群的密度, 盖度以及泡泡刺沙堆体积和高度的空间格局进行研究^[3]; 王兵对民勤绿洲—荒漠过渡区的水量平衡进行了研究, 认为生态系统总的水量平衡特点是水分输入主要靠降水和土壤水分的水平运动补给, 而土壤和植被蒸发散是系统的主要输出项^[4]; 李秋艳等对戈壁和沙漠两种生境条件下泡泡刺种群的空间分布特征, 动态及其对风沙干扰的响应进行了研究^[5,6]; 赵成义等对三工河流域荒漠—绿洲边缘区土壤水分时空动态进行了研究, 认为有梭梭群落和骆驼刺群

落覆盖的沙地土壤剖面的含水量与裸沙地含水量显著不同, 裸沙地土壤水分无明显的层次性变化, 受降水及蒸发等因子影响明显, 且不同植物群落沙地土壤水分呈现明显的土壤水分积累期, 土壤水分消耗期和土壤水分稳定期^[7]。李禄军等分析了绿洲—荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化, 把土壤水分剖面分别为速变层、活跃层和次活跃层, 认为沙丘土壤水分时空动态变化主要受降雨、植被以及地表覆盖等因素的影响, 并对生态垫覆盖下沙丘各层间土壤含水量及其与沙丘剖面平均含水量的关系进行了分析^[8]; 常学向等对荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况的研究表明土壤湿度随植被盖度增大而减小, 随着植物生长土壤湿度下降^[9]; 陈鹏等在分析阜康绿洲—荒漠过渡带景观的植被与土壤特征要素空间异质性时发现, 植被盖度、土壤表层含水量和土壤 pH 值沿样带相邻点差异对比明显, 高值区和低值区交错, 草本盖度与土壤表层含水量、土壤 pH 间有相关关系, 灌木平均盖度主要依靠深层次

2007-11-12 收稿, 2008-02-23 收修修改稿

^{*} 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-03)、中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-127)和国家自然科学基金(批准号: 90502004, 30500081)资助项目

^{**} 通信作者, E-mail: chenyan@ms.xjb.ac.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

地下水维系^[10]; 王惠等分析了黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植物空间变异, 认为土壤水分和植被空间分布在样带上存在明显的空间异质性, 表现在小于 100 m 的尺度上随机分布, 而在 100—3110 m 的尺度上呈聚集分布格局, 同时发现植被盖度、冠幅与 0—20, 20—40 cm 两层土壤湿度显著负相关($P < 0.05$), 与 120—140, 140—160 cm 两层土壤湿度显著正相关($P < 0.01$)^[11]. 这些研究多集中在绿洲荒漠过渡带植物种群多样性和空间格局特征、绿洲荒漠过渡带土壤湿度、地下水变化特征的描述, 对绿洲荒漠过渡带群落的水土环境与物种多样性特征关系的探讨并不多, 尤其是关于塔里木河下游绿洲荒漠过渡带的相关研究几乎为空白. 本文以塔里木河下游为研究对象, 分析绿洲—过渡带—荒漠植物群落物种多样性特征以及它们与以地下水和土壤水为主的环境水资源的关系, 旨在为阐明绿洲—荒漠带植被与水土资源的相互作用机制和保护塔里木河下游绿洲稳定, 加速下游生态恢复和重建提供理论依据.

1 研究区自然和植被概况

研究区位于塔里木河下游铁干里克绿洲边缘至英苏段, 包括绿洲—过渡带—荒漠, 北临尉犁县, 南靠若羌县, 属暖温带极干旱气候区. 气候干燥, 多风沙天气, 年均降水量 17.4—42.0 mm, 年均蒸发力高达 2500—3000 mm, 太阳年总辐射 5692—

6360 MJ/m², 日照时数 2780—2980 h, $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温为 4100—4300 $^\circ\text{C}$, 平均日较差 13—17 $^\circ\text{C}$, 是中国最干旱地区之一, 土壤多为碱化漠钙土和盐化草甸土, 浅层地下水主要由河水下渗和农业灌溉侧渗补给. 在极端的干旱气候和盐碱危害综合影响下, 研究区植被为荒漠植被, 典型特征是抗旱、耐盐, 主要表现为植被普遍存在泌盐, 渗透压高, 枝叶高度肉质化, 叶片小而厚等现象.

2 数据采集与研究方法

2.1 野外植被调查

2007 年 7 月进行野外调查, 以充分代表植被生长特点为原则, 将从铁干里克绿洲经过渡带至荒漠近 30 km 划分为 10 个植被群落断面(见图 1), 其中 C1, C2 在绿洲内, C3, C4 在绿洲与荒漠交错带上, C5, C6, C7, C8, C9, C10 在荒漠. 断面选择自然状态下, 无人干扰, 未经牲畜啃啮处建立永久性植被样地 3 个, 大小为 50 m \times 50 m, 以 GPS 进行定位, 记录每个样地的海拔高度, 经纬度. 每个样地分为 4 个 25 m \times 25 m 的乔灌木样方, 分别测定每个样方中乔、灌木的种类, 数量, 株高, 冠幅, 盖度, 密度, 频度等, 并在每个样方内按梅花形取样布设 5 个 1 \times 1 草本小样方. 调查草本种类, 个体数, 盖度, 密度, 频度等, 共设乔灌木样方 120 个, 草本小样方 420 个.

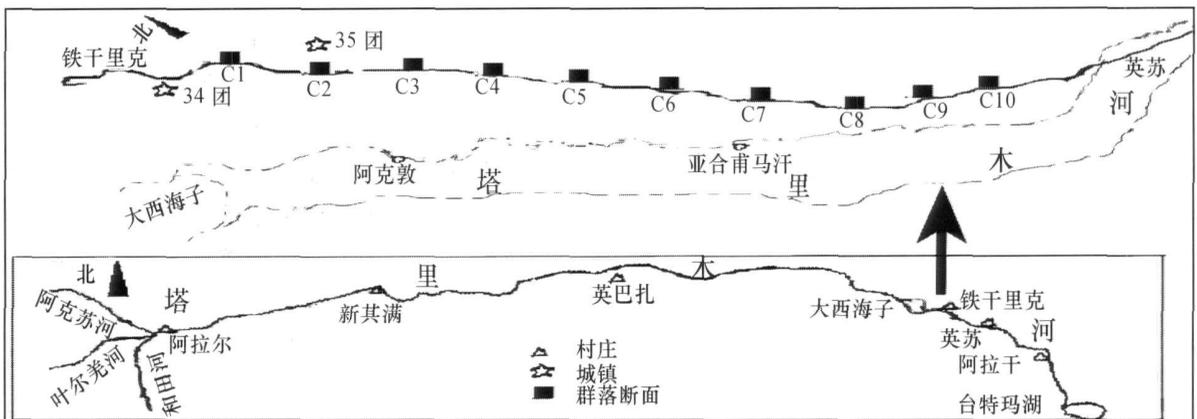


图 1 研究区示意图

2.2 土壤水分调查

植被调查同期, 在各植被样地挖取土壤剖面,

分别取 0—20, 20—50, 50—80 和 80—130 cm 土层土壤装入编号的铝盒中, 每一层土壤取 3 个重复,

采用 105 °C 烘干法测定土壤水分, 取各断面平均值为最终值.

2.3 地下水位调查

每个群落断面分别设立有 1 个 15 m 深地下水观测井, 于植被调查同期, 用电导法测定地下水埋深.

2.4 物种多样性指数计算方法

选用重要值 = (相对覆盖度 + 相对高度 + 相对密度) / 3 为计算依据, 计算物种丰富度指数 (R)、Shannon-Wiener 指数 (H)、Simpson 指数 (D) 和 Pielou 均匀度指数 (J_{sw}) 4 类物种多样性指数, 计算公式分别为:

(1) 物种丰富度指数 (R):

$$R = S$$

(2) Shannon-Wiener 指数 (H):

$$H = - \sum |n_i/N \lg(n_i/N)| = - \sum p_i \lg(p_i)$$

(3) Simpson 指数 (D):

$$D = 1 - \sum p_i^2$$

(4) Pielou 均匀度指数 (J_{sw}):

$$J_{sw} = H/\ln S = - \sum |n_i/N \lg(n_i/N)| / \ln S$$

式中 S 为出现在样方中的物种数, N 为群落中所有种的重要值之和, n_i 为第 i 个种的重要值, p_i 为第 i 个种的相对重要值, $p_i = n_i/N^{12}$.

3 结果与分析

3.1 研究区主要物种类型与特征

塔里木河下游绿洲—荒漠带植被群落稀疏, 以旱生乔灌木、半灌木和中生耐盐草本为主, 经 120 个乔灌木样方和 420 个草本样方调查, 共发现了 19 种高等植物, 分别为胡杨 (*Populus euphratica*), 柽柳 (*Tamarix spp.*), 黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum*), 盐穗木 (*Halostachys caspica*), 铃铛刺 (*Halimodendron halodendron*), 花花柴 (*Karelinia*

caspica), 芦苇 (*Phragmites communis*), 骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*), 甘草 (*Glycyrrhiza inflata*), 罗布麻 (*Apocynum venetum*), 牛皮消 (*Cynanchum auriculatum.*), 苦豆子 (*Sophora alopecuroides.*), 河西苜 (*Hexinia. polydichotama*), 西北天门冬 (*Asparagus persicus*), 猪毛菜 (*Salsola sp.*), 地肤 (*Kochia scoparia*), 刺沙蓬 (*Salsola ruthenica*), 盐生草 (*Halogeton glomeratus.*), 蒙古鸭葱 (*Scorzonera sp.*). 根据植被群落分类原则和系统, 将塔里木河下游绿洲—荒漠植物划分为 10 个群落类型, 从绿洲至荒漠依次为花花柴 + 柽柳群落 (C1), 黑刺 + 芦苇群落 (C2), 柽柳 + 花花柴群落 (C3), 胡杨群落 (C4), 柽柳 + 盐穗木群落 (C5), 柽柳群落 (C6), 柽柳 + 黑刺群落 (C7), 柽柳 + 甘草群落 (C8), 黑刺 + 花花柴群落 (C9), 胡杨 + 柽柳群落 (C10). 各群落组成简单, 乔、灌木层和草本层均不发达.

3.2 群落物种多样性特征

群落物种多样性分析结果表明, 塔里木河下游绿洲—荒漠带植物群落物种多样性指数均不高 (表 1). 物种丰富度指数变化依次为 $C1 > C3 > C9 = C2 > C8 > C4 > C10 > C7 > C5 = C6$; Shannon-Wiener 多样性指数 (H) 最高是 C1 群落, 为 0.8144, 其次为 C3, C9, C10, C8 群落, C7, C4, C5 和 C6 群落物种多样性指数较低, C2 群落最低; Simpson 优势度指数 (D) 也存在差异, C1, C3, C9, C10 群落的优势度较高, 其次为 C8, C5, C4, C7, 和 C6 群落, Simpson 优势度指数最低的依然是 C2 群落; 从各群落的 Pielou 均匀度指数 (J_{sw}) 看, 群落 C7, C5 较高, 其次依次为 $C9 > C1 > C3 > C10 > C6 > C8 > C4$, Pielou 均匀度指数最低的仍然是群落 C2. 因此, 研究区的 10 个群落物种多样性变化表现为 4 个层次. 第一层次以 C1, C3, C9 群落为代表, 具有较高物种丰富度, 多样性, 优势度和中等均匀度; 第二层次以 C4, C8, C10 群落为代表, 具有中等物种丰富度, 多样性和较低优势度, 均匀度; 第三层次以 C5, C6, C7 群落为代表, 具有较低物种丰富度, 多样性和中等优势度, 较高的均匀度; 第四层次是 C2 群落, 虽然物种丰富度较高, 但多样性, 优势度和均匀度均最低.

表 1 绿洲—荒漠带群落多样性指数

群落编号	群落类型	<i>R</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>J_{sw}</i>
C1	花柴—柽柳群落	13	0.8144	0.7792	0.3175
C2	黑刺—芦苇群落	9	0.2412	0.2215	0.1160
C3	柽柳—花柴群落	11	0.7456	0.7640	0.3109
C4	胡杨群落	7	0.3599	0.4045	0.1850
C5	柽柳—盐穗木群落	2	0.3246	0.4919	0.4682
C6	柽柳群落	2	0.2661	0.3295	0.2422
C7	柽柳—黑刺群落	3	0.3882	0.5546	0.5600
C8	柽柳—甘草群落	8	0.4497	0.4518	0.2047
C9	黑刺—花柴群落	9	0.7426	0.7993	0.3380
C10	胡杨—柽柳群落	5	0.5748	0.6080	0.2954

3.3 群落物种多样性对水资源的响应

3.3.1 对地下水埋深的响应 从绿洲至荒漠, 整体趋势来看, 地下水埋深随着距绿洲距离的加大逐渐加深. C1 群落到 C7 群落的地下水埋深分别为 3.44, 3.31, 6.09, 4.76, 7.99, 9.02, 8.33 m. C8—C10 群落虽距绿洲较远但因靠近塔里木河河道, 受河道生态输水的下渗和侧渗影响, 地下水埋深有所回升, 其中 C9 最接近河道, 地下水埋深最浅, 仅为 3.12 m. C8, C10 地下水埋深分别为 7.86, 5.83 m. 可见, 塔里木河下游的生态应急输水对河道周边的生态恢复起到了明显的作用. 按地下水埋深梯度变化来看, C1, C2, C9 群落地下水埋深在 4 m 范围内; C4, C10 群落地下水埋深在 4—6 m; C3, C8 群落地下水埋深在 6—8 m; C5, C7, C6 群落地下水埋深 > 8 m.

图 2 显示, 从绿洲至荒漠, 群落物种多样性的层次变化与地下水埋深的梯度变化有关. 从物种丰富度指数来看, 当地下水埋深在 4 m 内时, 物种丰富度最高, 为 9—13 种; 当地下水埋深在 4—6 m 时, 物种丰富度下降至 5—7 种; 当地下水埋深下降至 6—8 m 时物种丰富度升高, 8—11 种; 而当地下水埋深 > 8 m 后, 物种丰富度迅速下降为 3 种, 特别是地下水埋深 > 9 m 的 C6 群落仅生长着柽柳和黑刺两种灌木. 从 Shannon-Wiener 多样性指数 (*H*), Simpson 优势度指数 (*D*) 来看, 地下水埋深同在 4 m 内的 C1, C2, C9 群落, *H*, *D* 值变异很大. 群落 C1 地下水埋深在三群落中最深, 但 *H*, *D* 指数最高; 群落 C2 地下水埋深居中, 但 *H*, *D*

指数最低; 群落 C9 地下水埋深最浅, 但 *H*, *D* 值介于 C1 和 C2 之间. 当地下水埋深继续下降 4—6 m 时, 群落 C4, C10 的 *H*, *D* 值开始下降; 但当地下水埋深持续下降到 6—8 m 时, 群落 C3 和 C8 的 Shannon-Wiener 多样性指数 (*H*) 和 Simpson 优势度指数 (*D*) 反而有所上升. 当地下水埋深 > 8 m 后, Simpson 优势度指数 (*D*)、Shannon-Wiener 多样性指数 (*H*) 迅速下降. Pielou 均匀度指数在地下水埋深 < 8 m 内, 其变化与丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数一致, 但当地下水埋深 > 8 m 后, 均匀度指数有所升高, 这可能是由群落 C5, C6, C7 只生长着植株矮小, 长势衰败, 但分布较均匀的柽柳, 盐穗木和黑刺三种灌木所致.

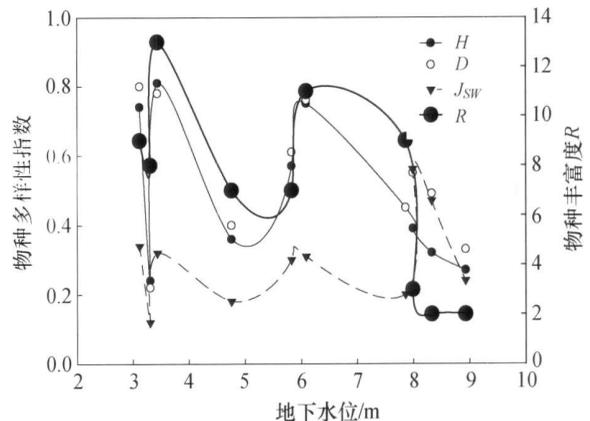


图 2 群落物种多样性指数与地下水埋深关系

3.3.2 对土壤水分的响应 图 3 是 0—20, 20—50, 50—80, 80—130 cm 土层的含水量变化. 从绿洲至荒漠, 土壤含水量整体趋势随距绿洲距离呈下降趋势, 绿洲 > 过渡带 > 荒漠, 但不同土层含水量变化幅度不一样. 其中, 0—20 cm 表层土壤含水量在绿洲内变化不大, 从绿洲内到过渡带呈直线下降, 从过渡带的 C3—C4 到荒漠区的 C5—C10, 表层土壤含水量变化不大. 20—80 cm 土层含水量从绿洲到过渡带仍然表现为急剧下降, 随后逐渐下降, 但在群落 C7 后开始回升, 在 C8 群落达到一个峰值. 且随着土层深度的加深, 这种突变的情形越明显, 这与 C8 群落的物种丰富度较高正好一致. 80—130 cm 以下土层含水量变化比较大, 在群落 C2 处出现了急剧下降, 而在群落 C3 和 C8 处都升

至一峰值,这一情形正好与 C3, C8 的物种多样性指数高而 C2 群落低完全吻合.各土层与物种多样性的相关分析也表明,表层土壤水分对物种多样性影响不大,但深层土壤水分,特别是 80cm 以下土层土壤水分与物种多样性密切相关(表 2).值得说明的是, C9 群落的深层土壤含水量比 C8 群落低,但由于 C9 群落的地下水埋深浅,物种丰富度较高,群落中植物密度为 2.52 株/m²,是 C8 群落的近 6 倍;且与 C2 群落物种类型相比, C9 群落中灌木占优势, C2 群落草本占优势,灌木植物较草本植物根系扎根深,受地下水的影响相对较大而受土壤水的影响相对较小.因此, C9 群落物种多样性也相对较高.

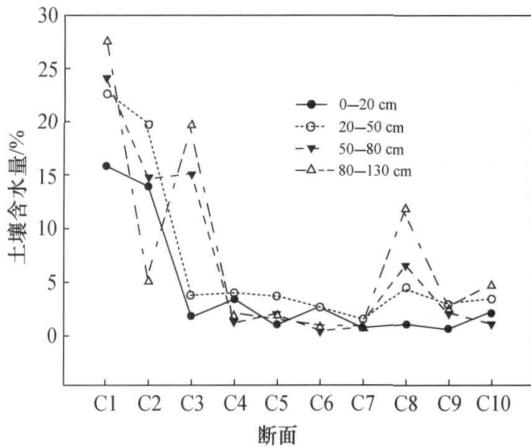


图 3 绿洲—荒漠带各群落 0—130 cm 土壤含水量

表 2 物种多样性指数与土壤含水量相关性分析^{a)}

	0—20 cm 土壤含水量	20—50 cm 土壤含水量	50—80 cm 土壤含水量	80—130 cm 土壤含水量
<i>H</i>	0.459	0.598	0.652	0.821 **
<i>D</i>	0.556	0.614	0.685 *	0.859 **
<i>J_{sw}</i>	0.127	0.143	0.247	0.428

a) *表示相关性达到 0.05 显著水平(双尾); **表示相关性达到 0.01 显著水平(双尾)

4 讨论与结论

(1) 塔里木河下游绿洲—荒漠带生态环境脆弱,群落物种组成简单,经 10 个断面 30 个样地的调查,共发现 19 种植物,其中乔木 1 种,灌木 4 种,草本 15 种.与同温带其他群落类型多样性相比^[12-15],塔里木河下游绿洲—荒漠带各群落物种丰

富度指数(*R*), Shannon-Wiener 指数(*H*), Simpson 优势度指数(*D*), Pielou 均匀度指数(*J_{sw}*)均较低.其中 Shannon-Wiener 多样性指数仅为 0.2412—0.8144,且种群分布极不均匀, C5, C6, C7 群落仅生长着柽柳、盐穗木和黑刺三种灌木.

(2) 水是植物生长发育的必需元素之一,在一定程度上,水分制约着物种的形成、进化、演替和分布^[16-17].植物生长发育所需水分主要来源于地表水、土壤水和地下水.本研究区极端干旱,降雨稀少,很难形成地表径流,地表水可以忽略不计,维系植物生存的水分主要是地下水和土壤水.本研究区发现,地下水埋深 < 4 m,群落物种丰富度指数(*R*), Shannon-Wiener 指数(*H*), Simpson 优势度指数(*D*), Pielou 均匀度指数(*J_{sw}*)均比较高,物种保持在 9 种以上, Shannon-Wiener 指数(*H*), Simpson 优势度指数(*D*)在 0.7 以上;随着地下水埋深的下降(4—8 m),物种多样性也下降,物种减少到 5—7 种, Shannon-Wiener 指数(*H*), Simpson 优势度指数(*D*)在 0.4—0.6 之间变动;当地下水埋深 > 9 m 后,仅生存着 2 种灌木,且群落中植物矮小、长势衰败.因此从维持群落物种多样性来看, < 4 m 是保护绿洲—荒漠带稳定的植被合理地下水埋深, 9 m 是绿洲—荒漠带植被生存的极限水位.

(3) 从绿洲至荒漠,物种丰富度指数(*R*), Shannon-Wiener 指数(*H*), Simpson 优势度指数(*D*), Pielou 均匀度指数(*J_{sw}*)并未随地下水埋深的加深而成规律性递减.如地下水埋深同处 4 m 内的 C1, C2, C9 群落, *H*, *D* 值的变异很大, C9, C2 群落地下水埋深都比 C1 浅,但其 Shannon-Wiener 指数(*H*), Simpson 优势度指数(*D*)却比 C1 群落低很多,这一变化与群落 80 cm 以下深层土壤含水量变化相一致.这种现象在地下水埋深较深的情况下更为明显, C3, C8 两群落地下水埋深较深,但由于深层土壤,特别是 80 cm 以下土层的含水量高,导致群落多样性指数也较高;同样, C4, C10 群落的地下水埋深在 4—6 m,远比群落 C3, C8 浅,但由于深层土壤含水量低,反而使得群落物种多样性指数降低.由此可见,地下水埋深和 80 cm 以下深层土壤含水量共同影响着绿洲—荒漠带群落物种多样性,特别是在地下水埋深较深的群落, > 80 cm 土壤含水更是对群落物种多样性起着决定作用.

(4) 塔里木河是世界著名内陆河流之一, 是保障塔里木盆地绿洲经济、社会和自然生态的生命线, 承载着我国重要的国家级棉花基地、能源战略接替区和石油化工基地, 在新疆发展战略中具有十分重要的地位^[18]. 恢复和重建塔里木河下游生态环境是流域经济社会发展亟待解决的问题. 众多学者就塔里木河下游荒漠区作了很多研究^[19-25], 但关于下游绿洲—过渡带—荒漠的研究尚未见报道. 弄清绿洲经过渡带至荒漠的植被发生演变机制, 土壤盐碱化和荒漠化发生机理对于维护绿洲稳定, 提高绿洲土地生产力, 加速下游植物恢复和再生, 抑制荒漠区土地荒漠化扩展, 恢复和重建塔里木河下游生态环境, 具有重要的理论指导和决策意义. 因此, 今后应加强对塔里木河下游绿洲—过渡带—荒漠的水—土—植被系统的研究, 以期为保证绿洲可持续发展、加速下游生态恢复找到新的突破口.

参 考 文 献

- 1 贾宝全. 新疆生态用水量的初步估算. 生态学报, 2000, 20(2): 243—250
- 2 贾宝全, 慈龙骏. 绿洲景观生态研究. 北京: 科学出版社, 2003
- 3 何志斌, 赵文智. 黑河流域荒漠绿洲过渡带两种优势植物种群空间格局特征. 应用生态学报, 2004, 15(6): 947—952
- 4 王 兵, 崔向慧. 民勤绿洲—荒漠过渡区水量平衡规律研究. 生态学报, 2004, 2: 235—240
- 5 李秋艳, 何志斌, 赵文智, 等. 不同生境条件下泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)种群的空间格局及动态分析. 中国沙漠, 2004, 24(4): 484—488
- 6 李秋艳, 赵文智, 李启森, 等. 荒漠绿洲边缘区泡泡刺种群对风沙干扰的响应. 生态学报, 2004, 24(1): 2484—2491
- 7 赵成义, 王玉朝. 荒漠—绿洲边缘区土壤水分时空动态研究. 水土保持学报, 2005, 19(1): 124—127
- 8 李禄军, 蒋志荣, 车克钧, 等. 绿洲—荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律. 水土保持学报, 2007, 21(1): 123—127
- 9 常学向, 赵爱芬, 赵文智, 等. 黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况. 水土保持学报, 2003, 17(2): 126—129
- 10 陈 鹏, 初 雨, 顾峰雪, 等. 绿洲—荒漠过渡带景观的植被与土壤特征要素的空间异质性分析. 应用生态学报, 2003, 14(6): 904—908
- 11 王 蕙, 赵文智, 常学向. 黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异. 生态学报, 2007, 27(5): 1731—1739
- 12 张林静, 岳 明, 张远东, 等. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带植物群落物种多样性特征. 地理科学, 2003, 23(3): 329—334
- 13 马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II ——丰富度均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 1995, 15(3): 268—277
- 14 李新荣, 张新时. 鄂尔多斯高原荒漠化草原与草原化荒漠灌木类群生物多样性的研究. 应用生态学报, 1999, 10(6): 665—669
- 15 白永飞, 李凌浩, 王其兵, 等. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化的样带研究. 植物生态学报, 2000, 24(6): 667—673
- 16 田晶会, 贺康宁, 王百田, 等. 不同土壤水分下黄土高原侧柏生理生态特点分析. 水土保持学报, 2005, 19(2): 175—183
- 17 黄建辉, 林光辉, 韩兴国. 不同生境间红树科植物水分利用效率的比较研究. 植物生态学报, 2005, 29(4): 530—536
- 18 宋育东, 樊自立, 雷志栋, 等. 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
- 19 刘家珍, 陈亚宁, 李卫红, 等. 荒漠河岸植被的受损过程与受损机理分析. 地理学报, 2006, 61(9): 946—956
- 20 Chen YN, Wang QA, Li WH, et al. Rational groundwater table indicated by the eco-physiological parameters of the vegetation: A case study of ecological restoration in the lower reaches of the Tarim River. Chinese Science Bulletin, 2006, 51, Supp. 1: 18—15
- 21 张丽华, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河下游生态输水对植物群落数量特征的影响. 干旱区研究, 2006, 23(1): 32—38
- 22 Chen YN, Zilliacus H, Li WH, et al. Ground-water level affects plant species diversity along the lower reaches of the Tarim river, Western China. Journal of Arid Environments, 2006, 66: 231—246
- 23 Li ZA, Chen YN. Physiological responses of three contrasting plant species to groundwater level changes in an arid environment. Journal of Integrative Plant Biology 2006, 48(5): 520—526
- 24 陈永金, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河下游地下水化学特征对输水响应的阶段性研究. 环境科学, 2006, 27(7): 1299—1304
- 25 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河下游土壤特性及荒漠化程度研究. 水土保持学报, 2007, 21(1): 44—49