

荒漠区植被对地下水埋深响应研究进展

赵文智, 刘 鹤

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 临泽内陆河流域综合研究站, 寒旱区流域水文及应用生态实验室, 兰州 730000)

摘要:荒漠区植被包括以旱生植物为主的荒漠植被和以中生植物为主的荒漠河岸林。综述了荒漠区植被对地下水埋深在个体、种群、群落以及斑块尺度上响应的研究成果, 指出: 荒漠区植物对地下水埋深的响应并不是简单的线性关系, 而是植物适应气候、土壤、地下水等环境因素综合作用的结果, 应在地下水与植被达到平衡态的基础上充分考虑生境土壤异质性、植被可塑性并采用长期定位和控制试验相结合的方法进行综合研究。强调在今后的研究中, 加强同位素示踪技术和高光谱遥感技术的应用, 开展植物水力提升及其机理研究; 加强荒漠区植被对地下水响应机理研究特别是微观尺度(分子水平)和响应过程长期定位研究; 重视植被响应地下水位波动和水质变化的研究; 强化在景观尺度和生态系统尺度集成研究, 以便为管理包括地下水在内的荒漠生态系统提供依据。

关键词:荒漠区植被; 地下水埋深; 尺度; 响应

文章编号:1000-0933(2006)08-2702-07 **中图分类号:**Q948 **文献标识码:**A

Recent advances in desert vegetation response to groundwater table changes

ZHAO Wen-Zhi, LIU Hu (Linze Inland River Basin Comprehensive Research Station, Chinese Ecosystem Research Network, Laboratory of Watershed Hydrology and Ecology, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences; Lanzhou 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2702 ~ 2708.

Abstract: The aim of this paper is to review studies to evaluate how desert vegetation (including xerophytes growing in dry habitats and mesophytes constituting desert riparian forest) response to groundwater table changes at different scales (i.e. individual scale, population scale, community scale and patch scale). Results collected in this study show that desert vegetation response to groundwater table changes in a significant nonlinear way as a result of plant adaptation to the environmental factors such as climate, soil, and groundwater. Based on the review, it is pointed out that: soil heterogeneity and plant plasticity on the basis of the balance between groundwater and plant, and the combination of long-term monitoring with controlled experiments should be taken into consideration in the future researches; applications of isotopic trace technology and Hyperspectral-Remote-sensing technology should be enhanced to promote related researches in the future; plant hydraulic lift at the individual, community and ecosystem level, phenotypic plasticity and adaptive value of plant responding to the changing water quality as well as to the groundwater table fluctuations deserve more scientific attention; the responses of desert vegetation to groundwater table at microcosmic scale (molecule scale) and mechanisms provoking this kind of responses should be further studied; and integrated research at landscape scale and ecosystem scale, which served to provide basis for inland river basin management, also should be furthered.

Key words: desert vegetation; groundwater table; scale; responses

荒漠区地下水的富集主要受地层岩性和地质构造所控制, 多赋存于大型断陷盆地河谷平原区和山前冲-

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40571026); 中国科学院资源环境领域野外台站研究基金资助项目

收稿日期:2005-06-24; **修订日期:**2006-01-20

作者简介:赵文智(1966~), 男, 陕西定边人, 博士, 研究员, 主要从事干旱区生态水文学和恢复生态学研究. E-mail: zhaowzh@ns.lzb.ac.cn

Foundation item: The project was supported by The National Natural Science Foundation of China (No.40235053); The Field Station Research Foundation of CAS

Received date: --; **Accepted date:** --

Biography: ZHAO Wen-Zhi, Ph.D., Professor, mainly engaged in ecohydrology of water controlled ecosystem. E-mail: zhaowzh@ns.lzb.ac.cn

洪积倾斜平原区^[1,2]。干旱荒漠区植物生长对地下水有很强的依赖性^[3,4],地下水埋深直接影响着与植被生长关系密切的土壤水分和养分动态,是决定荒漠区植被分布、生长、种群演替以及荒漠绿洲存亡的主导因子^[5,6]。许多研究表明,地下水是多数荒漠区植被生存所依赖的最为重要的水分来源。如:亚利桑那 San Pedro 河流沿岸古丁氏柳(*Salix goodingii*)蒸腾的水分主要来源于地下水^[7];加利福尼亚山区非季节性河流沿岸,树木蒸腾的水分在大部分土壤干燥季节来自地下水^[8];亚利桑那西部的常年和季节性河流沿岸,弗里芒氏杨(*Populus fremontii*)和古丁氏柳(*Salix gooddingii*)在生长季节蒸腾的水分都来自地下水^[9];犹它州槭树林(*Acer negundo*)蒸腾的水分来自地下水而不是降水和地表水^[10]。对塔克拉玛干沙漠南缘策勒绿洲和沙漠过渡带植物生理学和灌溉模拟试验发现即使对荒漠植物进行灌溉,它们的生产力和水分状况都不会受到很大影响^[11,12],说明荒漠植被倾向于利用地下水而不是其他水分来源。从荒漠河岸林植被格局与地下水埋深等值线叠加的情况也能看出地下水埋深与绿洲植被动态关系非常密切^[13]。

荒漠区植被主要包括两大类,一类是长期适应干旱环境的旱生植物,另一类是靠地表径流和地下水得以维持的中生植物,荒漠河岸林是其主要分布区。荒漠区植被在长期的进化过程中形成了独特的适应地下水变化的机制,涉及到分布、生长、生理调节等^[14,15],这些机制在个体、种群、群落甚至在斑块尺度上都有不同反映。包括荒漠河岸林在内的荒漠区植被对地下水响应的研究一直是水文学、土壤学、生态学等学科共同关注的问题。Clements^[16]认为,“每一个植物或群落是它生长所需的条件的度量”,即根据植物或植物群落可以判断它们的生境条件。荒漠区植物对地下水变化有明显的指示意义^[17],研究荒漠区植被对地下水位的响应对认识浅层地下水变化与植物群落特征的耦合关系、揭示荒漠生态系统演变的水文学机制、理解维持荒漠生态系统的稳定性等方面都有重要意义。本文将对荒漠区植物在个体、种群、群落、斑块尺度上对地下水响应研究进行综述。

1 个体水平研究进展

1.1 生长响应

荒漠区植物个体生长对地下水位有明显的响应。Horton 对美国西部 Sonoran 沙漠地区荒漠河岸林两个优势种古丁氏柳(*Salix gooddingii*),怪柳(*Tamarix chinensis*)个体生长情况对地下水位响应研究表明:在地下水位下降速度为 0cm d^{-1} 时古丁氏柳(*Salix gooddingii*)幼苗长势最好,在地下水位下降速度为 1cm d^{-1} 时怪柳幼苗长势最好,随着地下水位的下降,生长率和存活率都开始明显下降^[18]。Kranjcec 等^[19]对狭叶杨(*P. angustifolia*)、小叶杨(*P. simonii*)、山杨(*Populus davidiana*)的研究发现随着地下水位下降速率的增加,3种植物的新枝生长率和蒸腾速率都会明显下降,而根系生长却受到促进,在地下水位下降速度为 4cm d^{-1} 时最大,在 10cm d^{-1} 时有两种杨树开始死亡。Gries 等^[20]关于荒漠区植物在恒定的地下水位条件下对地下水埋深响应的研究中发现地下水埋藏越深,单位叶面积地下生物量就越多,地上部分能获取的 C 也就越少。随着地下水埋深的增加,植物个体生长相对速率增长呈减小趋势。

荒漠区植物个体的表型特征也对地下水位的变化做出明显的响应。如胡杨(*Populus euphratica*)能在同一植株生长杨树叶和柳树叶以适应水分环境,其中柳树形叶光合效率低,蒸腾速率较低,耗水量小,而杨树形叶更能耐大气干旱,光合效率高,能经受更严重的环境胁迫,使胡杨在极端逆境下得以生存并能达到较高生长量。柳树叶的减少消失,反映了大气的干燥和地下水位的下降,柳树叶的丰度和大小可以作为其立地地下水位下降和胡杨衰退的表征^[21]。

荒漠区植物在地下水埋深增加时能主动减少对一些部位的供水使其枯死以维系整个植株的存活。Horton^[18,22]研究表明随着地下水位的下降,荒漠区植物的冠层枯死率会逐渐增加,并且在地下水埋深超过 2.5 ~ 3.0m 时,该值迅速增加。这种响应可能是荒漠区植物应对水分胁迫一种有效的调节机制。

1.2 水分生理响应

荒漠区植物的水分生理会对地下水位做出响应,这些响应包括水势、气孔导度、蒸腾速率、净光合速率以及 ^{13}C 同位素等指标的变化^[23]。

水势是植物水分状况的重要指标之一,低水势是其适应干旱的一种重要形式,受到水分胁迫的植物清晨水势会发生明显的下降^[24]。对弗里芒氏杨(*Populus fremontii*)和古丁氏柳(*Salix gooddingii*)在湿润年和干旱年水势研究发现:在湿润年份,由于地下水位较高,相对于干旱年份荒漠区植物表现出较高的叶片凌晨水势;随着地下水位的下降,植物叶片凌晨水势逐渐下降,这种相关关系在干旱年份尤其显著^[22,25],怪柳(*Tamarix chinensis*)水势对地下水位也有类似响应^[26],塔里木河下游胡杨枝条水势变化与地下水位变化关系密切,在一定范围的地下水位条件下,枝条水势随地下水位变化的降低而升高,但在地下水埋深较大情况下,胡杨枝条水势对地下水位变化的响应程度不强烈,表明胡杨自身具有较强的抗旱性与适应性,能够在地下水埋深较低的状态下,通过生理调节维持自身的水分需要,减小对地下水分的依赖^[27,28]。水势的响应与渗透调节有关,荒漠区植物体内的脯氨酸能通过渗透调节作用,使其在水分匮乏时降低其渗透势,从外界水势低的环境中继续吸收水分,以增强其耐旱性^[15, 29];陈亚宁等^[15,30]发现胡杨体内的脯氨酸含量随地下水位埋深的增加而增加,证实了脯氨酸累积对地下水位变化的响应以及与水分胁迫程度的密切关系。研究还发现:胡杨体内脯氨酸在地下水位 3.63~5.14m 和 9.46~10.16m 之间的两个区段发生异常积累。结合相关的地下水位实测资料,推断第一个区段应该是塔里木河下游胡杨正常生长的胁迫水位,第二个区段是胡杨生存的临界水位。

气孔导度对地下水位变化十分敏感。气孔导度对地下水位的响应表现出与叶片凌晨水势类似的趋势,即随着地下水位的下降,气孔导度逐渐下降^[18,31]。脱落酸作为一种根-冠间交流的逆境信号,是植物对土壤水分状况变化的响应。干旱引起脱落酸累积的生理效应主要是导致气孔关闭,并通过对气孔运动及叶片生长速率的调节有效地减少干旱胁迫下的水分消耗^[32,33]。徐海量等^[30]对胡杨的叶片脱落酸含量与地下水位分析表明:随着地下水位的下降胡杨叶中的脱落酸含量明显增加,二者显著相关。联系胡杨在地下水位不断下降过程中枯梢、枯枝以及冠幅日趋减少这一事实来考虑,徐海量等^[30]认为这很有可能是胡杨在通过放弃一部分枝叶的生长来保证最低限度的水分消耗。该结论与季方等^[34]关于土壤水分对胡杨生长的研究以及宋郁东^[35]等对不同地下水位胡杨地表长势的调查结果是一致的。徐海量等还认为当胡杨在开始出现水分亏缺时与很多植物一样表现为脯氨酸和脱落酸含量明显增加^[30,36],之后随着水分条件的继续恶化,更多地表现在脱落酸含量的累积上。

净光合速率、¹³C同位素在一定程度上分别反映了植物所受的水分胁迫程度和对水分的利用效率,二者在干旱年份均随着地下水位的下降而下降^[18,22]。

蒸腾对地下水位的响应也很明显。赵明等人^[37]研究表明荒漠区植物在不同生长阶段对地下水位的响应也不尽相同:2年生植物蒸腾量随地下水位的下降而降低,3年生植物蒸腾量对地下水位响应不明显。张志强等对定植于不同地下水埋深的1~6年生花棒(*Hedysarum scoparium*)单株的蒸腾耗水规律^[38]的研究表明:1年生花棒2.6m和3.6m水位蒸腾耗水明显比1.6m水位的蒸腾耗水量大;4年生花棒不同地下水埋深蒸腾耗水相差不大,但均较1年生花棒蒸腾量有较大的增加;6年生花棒1.6m水位埋深条件下蒸腾耗水量最大。

2 种群水平研究进展

2.1 种群分布对地下水位的响应

大多数荒漠区植被只生长在地下水位适宜的生境中^[39]。荒漠区植物种和环境因子间呈非线性的二次曲线关系,如王芳等研究表明荒漠区植物物种出现频率与地下水位的的关系可以用高斯模型表述,出现频率峰值所对应的地下水埋深分别是胡杨3.2m、怪柳3.7m、芦苇1.9m、罗布麻2.7m、甘草2.9m、骆驼刺3.4m。地下水埋深小于2.5m的最适植物种群是湿生的芦苇;埋深在2.5~3.0m的最适植物种群是以罗布麻、甘草为优势种的草甸植被;埋深在3~3.5m的适宜植物种群有胡杨林,在3.5~4.0m的适宜种群有怪柳,同时3.0~4.0m这一埋深范围也是以骆驼刺等植物为优势种的荒漠化草甸的适宜区^[40,41]。张丽等^[42]认为正偏态对数正态分布模型更适于拟合干旱环境中植物种和地下水位之间的关系,两个模型得出的结果虽有差异,但大致趋势却是相似的。

2.2 种群特征对地下水位的响应

种群特征对地下水位响应规律明显。芦苇种群是研究干旱区植物与地下水埋深关系的理想种群^[43],能很好反映荒漠区植物种群与地下水位之间的普遍响应关系。赵文智等的研究表明,地下水埋深对芦苇种群的影响明显,在湿地和地下水埋深小于 0.5m 的生境中,芦苇种群表现为高的种群密度、低的种群高度、低的地上生物量和高的地下生物量;在地下水埋深为 1.5m 左右的生境中,芦苇种群地上生物量最高,生长最旺盛;在地下水埋深 1.5m 左右的生境中,芦苇的垂直根茎对种群生物量影响十分显著($p < 0.01$);在地下水埋深 1.5~4.0m 的生境中,影响显著($p < 0.05$),但在地下水埋深 4m 以上的生境中影响不显著,这表明在荒漠绿洲区,芦苇对地下水适应的最大埋深在 4m 左右。说明在水分条件较好的生境中,芦苇种群以高密度和小个体的生长状况来适应湿生环境,随着地下水埋深的增加,芦苇种群特征趋向小密度和大个体的生长状况^[5]。这种响应规律也符合生态学上的种群自疏法原则^[44]。

3 群落水平研究进展

3.1 群落内种群间特殊的水分利用格局响应地下水变化

荒漠区植物群落物种间通过水力提升(hydraulic lift)作用,形成的特殊水分利用格局来响应地下水的变化。水力提升作用就是深根系植物将吸收的深层土壤水(包括地下水)再通过根系提升释放到上层土壤的过程。提升上来的水分使群落内其它植物“坐享其成”^[45,46]。Horton 等^[47]认为水力提升可能是邻近植物的一个重要水源,能够极大地促进植物的生长,它增加了水力提升植物的竞争能力,增加了邻近非水力提升植物的竞争能力从而改变了群落组成和分布格局。如在纽约州的夏季干旱季节,地下水被糖槭(*Acer sacchaum*)水力提升上来,供附近浅根系的草本、灌木和幼树生长。但对于水力提升的研究目前尚处于起步阶段,关于群落组成和分布格局在水力提升作用下对地下水位的响应目前还没有更多相关报道。

3.2 群落演替对地下水埋深的响应

荒漠区植物群落演替是其对地下水变化响应的结果。随着地下水埋深的增加,群落多从湿生系列过渡到旱生系列,植被的旱生化程度逐渐加剧,主要表现在:(1)在群落组成上,荒漠植被进一步取代草甸植被成为优势种;(2)在种类、数量和群落结构上,只有草甸植物中具有较大生态幅和适应能力的种类保存下来,其余种类均逐渐衰败以致消亡。随着地下水埋深的加大,物种多样性指数逐渐降低,植物种类逐渐减少,植物群落结构趋向简单^[48,49]。例如额济纳绿洲的沿河地段,从河流沿岸到外围戈壁,随地下水位的下降,植被的演替趋势是:芦苇、芨芨草草甸→胡杨、沙枣乔木林→柽柳灌木林→苏枸杞、盐爪爪等耐旱盐草→梭梭、红砂等戈壁荒漠植被;在尾间湖盆地,从湖心到沙漠,随地下水位的下降,植被演变规律是:芦苇沼泽→金代代、水葫芦草甸→芦苇草甸→芦苇盐土草甸→零星芦苇盐壳→梭梭、白刺、沙拐枣沙地→梭梭^[50]。杨自辉^[51]、刘加珍^[52]、徐海量等^[53]的研究也得出类似的结论。但徐海量等^[53]考察的是生态输水后地下水位上升条件下的植物群落的响应情况。

3.2 植物群落演替对地下水位波动的响应

荒漠区植物群落对地下水位的响应不仅体现在随地下水位空间变化呈现出优势种群的过渡,同时也体现在群落对地下水位波动的响应上。在额济纳荒漠区,相同的植被景观,地下水位埋深却相差约 3.0m。其原因可能是构成绿洲的各植物种群消长与水文条件变动下相应的地下水位变幅有关,沿河区地下水埋深年变幅约 1~2m,而位于古居延洼地的绿城子地下水位年变幅小于 0.5m^[50]。因此,荒漠区植被的生长、分布不仅与地下水位埋深有关,而且还与地下水位变幅的大小有关,但这方面的研究还十分薄弱。

4 斑块尺度研究进展

van Collier 等用斑块等级和梯度相结合的方法探讨了河岸林植被与环境的关系^[54];赵文智等对额济纳荒漠河岸林的研究表明:在垂直河道方向,随地下水位埋深的增加,退化林地斑块尺度上呈显著的增加趋势;在平行河道方向,随地下水位埋深的增加,林地和退化林地斑块平均面积呈显著的减少趋势^[13]。荒漠区天然绿洲斑块面积和植被盖度与地下水位埋深关系密切。随着地下水位的下降,天然绿洲斑块面积逐渐减小,植被盖度明显下降。

5 研究展望

以往的研究更多的集中在植被对地下水位的下降和上升的响应研究,对植被响应地下水位波动的研究比较薄弱,这样使得对理解植被与地下水是否到达平衡态存在知识缺陷,在方法论上影响着建立的植被与地下水位关系的可信度。植被对地下水水质响应的研究方面开展的工作不多,应予以重视。

地下水埋深与植物的关系方面并不是简单的统计线性关系,而是植被、土壤、地下水综合作用的复杂系统。应充分考虑生境土壤异质性、植被可塑性,采用长期定位和控制条件实验相结合的方法,在地下水与植被达到平衡态的基础上综合研究。

植物水力提升机理研究具有重要的应用价值,应加强同位素示踪技术的应用,深入开展这方面的研究。

荒漠区植被响应地下水机制尚不完全清楚,应加强荒漠区植被对地下水响应机理研究特别是微观尺度(分子水平)的研究;在宏观尺度应加强景观尺度和生态系统尺度研究,加强相关研究的集成,以便对管理包括地下水在内的荒漠生态系统提供依据。

加强高光谱遥感技术的应用,开展植物对地下水响应过程长期定位研究。

References:

- [1] Hu R J, Fan Z L, Wang Y J, Jiang F Q. Groundwater resources and their characteristics in arid lands of Northwestern China. *Journal of natural resources*, 2002, 17(5): 321 ~ 326.
- [2] Zuo Q T, Wang Z G. Important scientific problems and prospect of about basin hydrological cycle in western china. *Northwest Water Resources & Water Engineering*, 2001, 12(4): 1 ~ 5.
- [3] Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 2000, 36: 3 ~ 9.
- [4] Zhong H P, Liu H, Wang Y, *et al.* Relationship between Ejina oasis and water resources in the tower Heihe River basin. *Advances in Water Science*, 2002, 13(2): 223 ~ 228.
- [5] Zhao W Z, Chang X L, Li Q S, *et al.* Relationship between structural component biomass of reed population and ground water depth in desert oasis. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1138 ~ 1146.
- [6] Fan Z L, Ma Y J, Zhang H, *et al.* Research of Eon mater Table and Rational Depth of Groundwater of Tarim River Drainage Basin. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 8 ~ 13.
- [7] Synder K A, William D C. Water resources used by riparian trees varies among stream types on the Pedro River, Arizona. *Agricultural and Forest Metrology*, 2000, 105: 1 ~ 2, 227 ~ 240.
- [8] Smith S D, Welling A B, Nachlinger J A, *et al.* Functional responses of riparian vegetation to streamflow diversions in eastern Sierra Nevada. *Ecological Application*, 1991, 1: 89 ~ 97.
- [9] Busch D E, Ingraham N L, Smith S D. Water uptake in woody riparian phreatophytes of the southwestern United States: a stable study. *Ecological Application*, 1992, 2: 450 ~ 459.
- [10] Dawson T E, Ehleringer J R. Stream trees that do not use stream water. *Nature*, 1991, 350: 335 ~ 337.
- [11] Li X Y, Zhang X M, Zeng F J, *et al.* Water relations on *Alhagi sparsifolia* in the southern fringe of Taklamakan Desert. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(10): 1219 ~ 1224.
- [12] Li X Y, Zhang X M, He X Y, *et al.* Water relation characteristics of four perennial plant species growing in the transition zone between oasis and open desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1164 ~ 1171.
- [13] Zhao W Z, Chang X L, He Z B. Responses of distribution pattern of desert riparian forests to hydrologic process in Ejina oasis. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2003, 33(supplementary volumes): 21 ~ 30.
- [14] Singh T N, Aspinall F, Paley L G. Proline accumulation and varietal adaptability to drought resistance. *Nature, New Biology*, 1972, 236: 189 ~ 190.
- [15] Chen Y N, Chen Y P, Li W H, *et al.* Response of the accumulation of proline in the bodies of *Populus euphratica* to the change of groundwater level at the lower reaches of Tarim River. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(9): 958 ~ 961.
- [16] Clements F E. *Plant Succession and Indicators*. New York: H.W. Wilson, 1928.
- [17] Zhang Y M, Cheng Y N, Zhang D Y. Plant communities and their interrelations with environmental factors in the middle reaches of the Tarim river. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 109 ~ 118.
- [18] Horton J L, Kolb T E, Hart S C. Responses of riparian trees to interannual variation in ground water depth in a semi-arid river basin. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24: 293 ~ 304.

- [19] Kranjec J, Mahoney J M, Root S B. The responses of three riparian cottonwood species to water table decline. *Forest Ecology and Management*, 1998, 110:77 ~ 87.
- [20] 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 and Environment*, 2003, 26:725 ~ 736.
- [21] Su P X, Zhang L X, Du M W, *et al.* Photosynthetic character and water use efficiency of different leaf shapes of *Populus euphratica* and their response to CO₂ enrichment, *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(1):34 ~ 40.
- [22] Horton J L, Thomas E K, Stephen C H. Physiological response to groundwater depth varies among species and with river flow regulation. *Ecological Applications*. 2001, 11(4):1046 ~ 1059.
- [23] Tan Y, Ye W S, Li L. Recent Advances in Physiological role of ABA, *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 18(2):197 ~ 201.
- [24] Sobrado MA, Turner NC. A comparison of the water relations characteristics of *Helianthus annuus* and *Helianthus petiolaris* when subjected to water stress. *Oecologia*, 1983, 58:309 ~ 31.
- [25] Horton J L, Clark J L. Water table decline alters growth and survival of *Salix gooddingii* and *Tamarix chinensis* seedlings. *Forest Ecology and Management*, 2001, 140:239 ~ 247.
- [26] A preliminary study on the effects of irrigation on water physiology of *Tarimix ramosissima* in Cele oasis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7):849 ~ 853.
- [27] Fu A H, Chen Y N, Li W H, *et al.* Analysis on the Changes of Stems Water Potential of *Populus euphratica* in Different Groundwater Level in Lower Reaches of Tarim River in Xinjiang. *Arid Land Geography*, 2004, 27(2):207 ~ 211.
- [28] Xu H L, Chen Y N, Li W H. Study on Response of Groundwater after Ecological Water Transport at the Lower Reaches of the Tarim River, *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(2):19 ~ 23.
- [29] Hakimi A, Monneveux P, Galiba G. Soluble sugars, Proline, and relative water content (RWC) as traits for improving drought tolerance and divergent selection for RWC from *T. polonicum* to *T. durum*. *Journal of Genetics & Breeding*, 1995, 49(3): 237 ~ 243.
- [30] Xu H L, Song Y D, Wang Q, *et al.* The effect of groundwater level on vegetation in the middle and lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(3): 400 ~ 405.
- [31] Thorburn P J, Walker G R. Variations in stream water uptake by *Eucalyptus camaldulensis* with differing access to stream water. *Oecologia*, 1994, 100: 293 ~ 301.
- [32] Bohnert H J, Jensen R G. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants. *Trends in Biotechnology*, 1996, 14:89 ~ 95.
- [33] Davies W J, Zhang J. Root signal and there gulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, 42:55 ~ 76.
- [34] Ji F, Ma Y J, Fan Z L. Soil water regime in *Populus euphratica* forest on the Tarim River alluvial plain. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25:17 ~ 21.
- [35] Song Y D, Fan Z L, Lei Z D, Study on water resources and ecology in Tarim River. Urumqi: Xinjiang People's Publishing Company, 1999.201 ~ 299.
- [36] Bray E A. Plant responses to water deficit. *Trends in Plant Science*, 1997, 2:48 ~ 54.
- [37] Zhao M, Guo Z Z, Wang Y L, *et al.* Study on the transpiration characteristics of 10 species of plants under the different depths of groundwater level. *Arid Zone Research*, 2003, 20(4):286 ~ 291.
- [38] Zhang Z Q, Wang S P, Jia B Q, *et al.* Tree-scale transpiration dynamics of *Hedysarum scoparium* in response to growth stage, groundwater table depth, and climate in a semi-arid environment in northwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 732 ~ 742.
- [39] Wu J H, Zhang S. *Phytogeography*. Beijing: Higher Education Press, 1995.39 ~ 50
- [40] Zhang J T, *Quantitative Ecological Methods*. Beijing: Chinese Scientific and Technological Press, 1995.
- [41] Wang F, Liang R J, Yang X L, *et al.* A study of ecological water requirements in northwest China I. theoretical analysis. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(1):1 ~ 8.
- [42] Zhang L, Dong Z C, Huang X L. Modeling on relation between major plants growth and ground water depth in arid area. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(1): 110 ~ 113.
- [43] Vretare V, Weisner S E B, Strand J A, *et al.* Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth, *Aquatic Botany*, 2001, 69:127 ~ 145.
- [44] Yoda K, Kira T, Ogawa H, *et al.* Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *Journal of Biology [Osaka City University]*, 1963, 14:107 ~ 129.
- [45] Richards J R, Caldwell M M. Hydrauliclift: Substantial nocturnal water transport between soil layers by a *Artemisia tridentata* roots. *Oecologia*, 1987, 73: 486 ~ 489.
- [46] Caldwell M M, Richards J R. Hydrauliclift: Water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots. *Oecologia*, 1989, 79:1 ~ 5.

- [47] Horton J L, Hart S C. Hydraulic lift: a potentially important ecosystem process. *Trends in Ecology and Evolution*, 1998, 13: 232 ~ 235.
- [48] Liu H, Zhong H P, Gu Y. Water Resources Development and Oasis Evolution in Inland River Basin of Arid Zone of Northwest China. A Case Study: Minqing Basin of Shiyang River. *Advances in Water Science*, 2001, 9(3): 378 ~ 384.
- [49] Zhang H F, Chen Y N, Chen Y P, *et al.* Species quantity change and ecosystem dynamics in the lower reaches of Tarim River. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4): 21 ~ 24.
- [50] Zhang W W, Ma X Z, Tan Z G. Study on relationship of vegetation distribution and groundwater in Ejina Plain. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2000, 14(5): 31 ~ 35.
- [51] Yang Z H. Research on desert vegetation changes for 40 years at Shajingzi Area in Minqin. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(4): 395 ~ 398.
- [52] Liu J Z, Chen Y N, Li W H, *et al.* Analysis on the distribution and degraded succession of plant communities at lower reaches of Tarim River. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (2): 379 ~ 383.
- [53] Xu H L, Song Y D, Chen Y N. Dynamic change of groundwater after ecological water transport at the lower reaches of Tarim River. *China Environmental Science*, 2003, 23(3): 327 ~ 331.
- [54] van Coller A L, Rogers K H, Heritage G L. Riparian vegetation-environment relationships: complementarity of gradients versus patch hierarchy approaches. *Journal of Vegetation Science*, 2000, 11: 337 ~ 350.

参考文献:

- [1] 胡汝骥,樊自立,王亚俊,等.中国西北干旱区的地下水资源及其特征. *自然资源学报*, 2002, 17(5): 321 ~ 326.
- [2] 左其亭,王中根.中国西部流域水循环重大科学问题及研究展望. *西北水资源与水工程*, 2001, 12(4): 1 ~ 5.
- [4] 钟华平,刘恒,王义,等.黑河流域下游额济纳绿洲与水资源的关系. *水科学进展*, 2002, 13(2): 223 ~ 228.
- [5] 赵文智,常学礼,李启森,等.荒漠绿洲区芦苇种群构件生物量与地下水埋深关系. *生态学报*, 2003, 23(6): 1138 ~ 1146.
- [6] 樊自立,马英杰,张宏,等.塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定. *干旱区地理*, 2004, 27(1): 8 ~ 13.
- [12] 李向义,张希明,何兴元,等.沙漠-绿洲过渡带四种多年生植物水分关系特征. *生态学报*, 2004, 24 (6): 1164 ~ 1171.
- [13] 赵文智,常学礼,何志斌.额济纳荒漠河岸林分布格局对水文过程响应. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(增刊): 21 ~ 30.
- [15] 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.
- [17] 张元明,陈亚宁,张道远.塔里木河中游植物群落与环境因子的关系. *地理学报*, 2003, 58(1): 109 ~ 118.
- [21] 苏培玺,张立新,杜明武,等.胡杨不同叶形光合特性、水分利用效率及其对富 CO₂ 的响应. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 34 ~ 40.
- [23] 谭云,叶庆生,李玲.植物抗旱过程中 ABA 生理作用的研究进展. *植物学通报*, 2001, 18(2): 197 ~ 201.
- [26] 曾凡江, Andrea Foetzi, 李向义,等.策勒绿洲多枝怪柳灌溉前后水分生理指标变化的初步研究. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 849 ~ 853.
- [27] 付爱红,陈亚宁,李卫红,等.新疆塔里木河下游不同地下水位的胡杨树势变化分析. *干旱区地理*, 2004, 27(2): 207 ~ 211.
- [28] 徐海量,陈亚宁,李卫红.塔里木河下游生态输水后地下水的响应研究. *环境科学研究*, 2003, 16(2): 19 ~ 23.
- [30] 徐海量,宋郁东,王强,等.塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响. *植物生态学报*, 2004, 28(3): 400 ~ 405.
- [34] 季方,马英杰,樊自立.塔里木河冲积平原胡杨林的土壤水分状况研究. *植物生态学报*, 2001, 25: 17 ~ 21.
- [35] 宋郁东,樊自立,雷志栋.塔里木河水资源与水生态研究. 乌鲁木齐:新疆人民出版社, 1999. 201 ~ 299.
- [37] 赵明,郭志中,王耀琳,等.不同地下水位植物蒸腾耗水特性研究. *干旱区研究*, 2003, 20(4): 286 ~ 291.
- [38] 张志强,王盛萍,贾宝全,等.甘肃民勤地区不同地下水位深花棒蒸腾耗水研究. *生态学报*, 2004, 24(4): 732 ~ 742.
- [39] 武吉华,张绅. *植物地理学*. 北京:高等教育出版社, 1995. 39 ~ 50.
- [40] 张金屯. *植被数量生态学方法*. 北京:中国科学技术出版社, 1995.
- [41] 王芳,梁瑞驹,杨小柳,等.中国西北地区生态需水研究 I. 干旱半干旱地区生态需水理论分析. *自然资源学报*, 2002, 17(1): 1 ~ 8.
- [42] 张丽,董增川,黄晓玲.干旱区典型植物生长与地下水位关系的模型研究. *中国沙漠*, 2004, 24(1): 110 ~ 113.
- [48] 刘恒,钟华平,顾颖.西北干旱内陆河区水资源利用与绿洲演变规律研究——以石羊河流域下游民勤盆地为例. *水科学进展*, 2001, 9(3): 378 ~ 384.
- [49] 张宏锋,陈亚宁,陈亚鹏,等.塔里木河下游植物群落的物种数量变化与生态系统动态研究. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 21 ~ 24.
- [50] 张武文,马秀珍,谭志刚.额济纳平原植被分布与地下水关系的研究. *干旱区资源与环境*, 2000, 14(5): 31 ~ 35.
- [51] 杨自辉.民勤沙井子地区 40a 来荒漠植被变迁初探. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 395 ~ 398.
- [52] 刘加珍,陈亚宁,李卫红,等.塔里木河下游植物群落分布与衰退演替趋势分析. *生态学报*, 2004, 24 (2): 379 ~ 383.
- [53] 徐海量,宋郁东,陈亚宁.生态输水后塔里木河下游地下水的动态变化. *中国环境科学*, 2003, 23(3): 327 ~ 331.