

塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响

徐海量^{1 2} 宋郁东¹ 王 强² 艾合买提¹

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011) (2 新疆农业大学环境工程系, 乌鲁木齐 830052)

摘 要 根据近几年塔里木河中下游地区的大量监测结果, 分析了不同地下水位对植被的影响。结果显示: 1) 在塔里木河中下游, 地下水位与植被盖度和植物种类的回归模型分别可以表示为: $Y = 159.32e^{-0.3148X}$, $R^2 = 0.8193$, $p < 0.01$; $Y = 9.113e^{-0.1623X}$, $R^2 = 0.6067$, $p < 0.01$ 。2) 地下水位对植被的影响在很大程度上是通过改变土壤含水率来实现的, 当地下水位在 1~4 m 时, 其回归模型为: $Y = 64.898e^{-0.515X}$, $R^2 = 0.727$, $p < 0.01$; 当地下水位在 4~12 m 时, $Y = 21.147e^{-0.178X}$, $R^2 = 0.658$, $p < 0.01$ 。当地下水位在 3.5~4.0 m 时, 土壤含水率出现明显变化, 因此认为 3.5 m 是塔里木河中下游地区草本植被生态恢复的最低水位。3) 通过胡杨叶脯氨酸(Pro)和脱落酸(ABA)在不同水位条件下的含量变化, 可以认为引起胡杨水分胁迫的地下水位出现在 5.0 m。其后随着水位的降低, 胡杨脱落酸的积累更加明显, 地下水位与胡杨叶脱落酸含量可以表示为: $Y = 0.7035e^{0.408X}$, $R^2 = 0.8304$, $p < 0.01$ 。4) 通过塔里木河下游输水后的植被调查, 当地下水位出现明显升高后, 植被的地表生态响应非常明显, 乔灌木植被在水位升高至不同水位后均出现相应的变化, 说明以上的分析是符合实际的。

关键词 地下水位 植被 塔里木河 脯氨酸 脱落酸

THE EFFECT OF GROUNDWATER LEVEL ON VEGETATION IN THE MIDDLE AND LOWER REACHES OF THE TARIM RIVER, XINJIANG, CHINA

XU Hai-Liang^{1 2} SONG Yu-Dong¹ WANG Qiang² and AI Mti¹

(1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

(2 Institute of Environmental Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract Since shallow groundwater is the main source of vegetation growth in arid zones, groundwater level is one of the important eco-environmental factors affecting natural vegetation in the middle and lower reaches of the Tarim River in Xinjiang of China. Therefore, it is important to understand the relationship between the groundwater level and the vegetation. Accordingly, 12 monitoring sections with 58 monitoring wells and 58 vegetation sample plots were selected and established. Based on several years of monitoring data, we describe the influence of different levels of groundwater level on soil moisture content, vegetation (species and coverage) and the proline (Pro) and abscisic acid (ABA) content in the leaves of *Populus euphratica*. Regression models on groundwater level-vegetation coverage ($Y = 159.32e^{-0.3148X}$, $R^2 = 0.8193$, $p < 0.01$) and groundwater level-species ($Y = 9.113e^{-0.1623X}$, $R^2 = 0.6067$, $p < 0.01$) were both significant. The effect of groundwater level on vegetation function is expressed through soil moisture content, and ground water level also was significantly related to soil moisture content by the following regression models: $Y = 64.898e^{-0.515X}$, $R^2 = 0.727$, $p < 0.01$ (when the groundwater levels are between 1 to 4 m of the soil surface); and, $Y = 21.147e^{-0.178X}$, $R^2 = 0.658$, $p < 0.01$ (when groundwater levels are between 4 to 12 m below the surface). The soil moisture content changes significantly when the groundwater level drops to 3.5–4.0 m below the surface, henceforth, 3.5 m is regarded as the lowest groundwater level acceptable for restoration of the natural meadow vegetation. By analyzing the changes of the Pro and ABA content in the leaves of *P. euphratica*, we determined that water stress develops in these populations when groundwater levels drop below 5.0 m depth and that the ABA content is a more sensitive indicator of water stress than Pro content in the leaves. This relationship is described by the following equation: $ABA \text{ content} = 0.7035e^{0.408X}$, $R^2 = 0.8304$, $p < 0.01$. Our results indicate that ground water level is a critical ecological factor controlling the vegetation in the lower reaches of the Tarim River. Some xerophytic trees, meadows and bushes were restored by changing groundwater levels; hence, any vegetation restoration efforts in this region will need to manage ground water levels to be successful.

Key words Groundwater level, Vegetation, Tarim River, ABA, Pro

塔里木河流域地处欧亚大陆腹地,是我国典型的干旱荒漠区。由于气候干旱、降水稀少,地下水成为本区天然植被维系生存和发育的最主要水分来源。为此,许多专家、学者就人类不合理的水土资源开发对本地区地下水及植被的影响进行过分析。如利用遥感资料分析水资源的时空变化对土地荒漠化的影响(王让会等,1998);通过水资源变化研究塔里木河下游“绿色走廊”的衰败(李香云等,2001);通过水资源的形成、转化、消耗的分析探讨塔里木河流域的生态问题(宋郁东等,1999)。但是,以往的研究侧重点多集中在对区域水分状况的宏观研究上,缺乏较大区域和长期对地下水位和植被生长的详细观测资料 and 对比分析。为了全面整治塔里木河流域、拯救和恢复塔里木河下游绿色走廊以及为塔里木河下游正在开展的生态输水工程提供科学的依据,有必要对干旱地区地下水位与植被生长的关系进行系统地研究。

1 研究区域概况及研究方法

1.1 研究区域概况

塔里木河中、下游段系指从轮台县的英巴扎至塔里木河尾间台特玛湖,全长 826 km。本区属暖温带荒漠干旱气候,降水稀少,年平均降水量仅为 20 ~ 50 mm,而年平均蒸发量(潜势)却高达 2 500 ~ 3 000 mm。在干旱荒漠气候的控制下,该地区的地带性植被属温性灌木和半灌木荒漠。但由于有河水和地下水补给,河漫滩及两岸的低阶地发育着大面积非地带性的草甸植被,形成由胡杨(*Populus euphratica*)、灌木和草本植物组成的面积广阔的乔灌草带(梁匡一等,1990)。乔木主要有胡杨,灌木主要有怪柳(*Tamarix* spp.)、黑刺(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)等,草本植物主要有芦苇(*Phragmites communis*)、罗布麻(*Poacynum hendersonii*)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)等。由于塔里木河上游大规模的水土开发活动,造成塔里木河中游地区每年季节性过水,而下游地区因来水量日趋减少造成大西海子水库以下长达 321 km 河段自 1972 年以后基本断流。由此带来一系列的生态问题,首先是地下水位的大幅下降,英苏以下河段地下水位多降到 8 ~ 12 m;其次是荒漠河岸胡杨林的全面衰败,盐生草甸及盐柴荒漠植被大量消失,

植被成片死亡或濒于死亡;沙化面积逐年扩大,风蚀、风积作用日趋强烈,形成众多的风蚀洼地、灌丛沙堆、线形沙垄、流动沙丘等风沙地貌景观(刘晏良,2000)。

1.2 研究方法

为了准确把握地下水位对植被的影响,自 2000 年 8 月起,在塔里木河中下游沿河约 40 km 的间距共布设了 12 个监测断面,其中下游 9 个、中游 3 个。在每个断面上按一定间距布设了 58 口地下水监测井。在井附近建立永久性植被调查样地,大小为 50 m × 50 m,记录每种乔木(或灌木)的个体数、盖度、胸径、基径、高度、冠幅等指标,并用端点法对每株乔、灌木定位,随机设置 2 m × 2 m 草本小样方,记录每种草本植物的个体数、盖度、高度、冠幅、频度等指标。同时,在样地内挖土壤剖面,深度一般为中游 3 m,下游 5 m,分层取样。另外,定期进行植被生理指标的测试,摘取胡杨树不同部位生长正常的叶片经过混合作为分析样本,冷冻处理后送实验室分析叶片脯氨酸(Proline)和脱落酸(Abscissic acid)含量。其中 Pro 测定参照朱广廉方法(1983),首先将 0.03 g 材料放入 20 ml 大试管中加入 10 ml 无氨蒸馏水,封口后置沸水浴中 30 min,冷却后过滤,取滤液 5 ml 加茚三酮 5 ml,沸水中显色 60 min,甲苯萃取。萃取液用日本岛津 UV-265 型紫外分光光度计在波长 515 nm 处比色。ABA 测定参照文献阮晓等(2000),在实验室里取(0.1 ± 0.005) g 胡杨样品,液氮中研磨。500 μl 甲醇 4 ℃提取过夜。样品离心,上清液冷冻干燥。30 μl 10%的 CH₃CN 溶解样品。样品溶液 10 μl 于日本岛津 CTO-6A 型高效液相色谱仪分析,植物激素用外标法定量。

2 结果与分析

2.1 不同地下水水位的植被变化

塔里木河流域地处我国西部干旱区,特殊的干旱环境使得降水对植被生长的影响微乎其微,绝大多数天然植被生长所需的水分主要依靠地下水。由于地表径流量时空分布的巨大差异,从上而下沿河道周围的地下水位呈现逐渐下降的趋势,从中游上段的 2 m 左右逐渐下降到下游下段的 12 m 左右。相应地,在不同水位梯度条件下,地表植被长势也表现出相应的变化特点(图 1,图 2)。

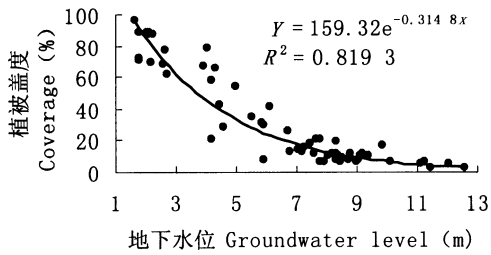


图 1 地下水位与植被盖度之间的回归分析
Fig.1 Regression analysis on relationship between groundwater level and coverage of vegetation

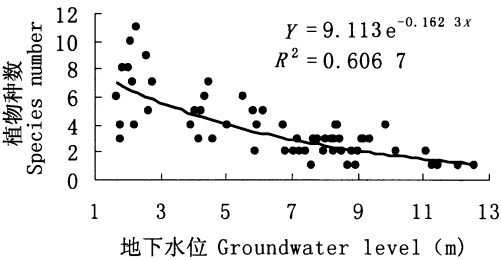


图 2 地下水位与植物种数的回归分析
Fig.2 Regression analysis on relationship between groundwater level and number of vegetation species

图 1、图 2 是根据地下水位监测资料(2001 年 10 月测)和对应的植被样地资料进行回归分析的结果。由于不同种属植物的抗旱性能及生长所要求的地下水位不同,因此不同的水位梯度上植被长势和出现的植物种也不同。根据调查,多数草本植被出现区域的地下水位一般在 3.5 m 以上,而当水位在 3.5 ~ 5.0 m 时,只能发现一些耐旱能力较强的罗布麻、胀果甘草、骆驼刺和少量长势不佳的芦苇。随着水位的继续下降,只有零星草本出现。当水位在 2.0 ~ 4.0 m 时,可以发现许多长势旺盛的灌木,如铃铛刺、柽柳、黑刺;地下水位在 4.0 ~ 6.0 m 的地区,铃铛刺、黑刺开始大面积死亡;水位在 9 m 以下时,只有胡杨的过熟林和断续分布的柽柳,而水位在 12 m 以下时,地表除了能见到低矮稀疏的刚毛柽柳(*Tamarix hispida*)外,基本看不见其它植物。从群落类型看:地下水位在 2.0 ~ 3.5 m 时,群落类型以胡杨-柽柳-芦苇群落和芦苇+柽柳-甘草群落为主,植被盖度一般在 40% 左右;地下水位在 3.5 ~ 5.0 m 时,群落类型以胡杨+柽柳-罗布麻群落、黑刺-柽柳群落为主,植被盖度基本在 10% ~ 30%;当地下水位在 5.0 ~ 12.0 m 时,群落类型以胡杨+柽柳群落、或者单一的胡杨林为主,植被盖度基本在 20% 以下;当地下水位超过 12.0 m 时,地表仅残存

个别植株。
这可以从不同地下水位的植被盖度和植被种类变化上得到反映。从图 1 看,植被盖度的变化与地下水位变化呈现出非常好的相关性,随着地下水位的下降,植被盖度以指数形式下降,二者的相关性 $R^2 = 0.8193$, $p < 0.01$,说明本区植被生长主要依靠地下水的补给;与此同时,随着地下水位的下降,样地内植物种类也逐渐下降,由最高的一个样地出现 12 种降到只剩下 1 种植物,说明随着水分条件的恶化,群落结构趋向单一。

2.2 地下水与土壤水的转化

沿塔里木河两岸分布的自然植被,主要是非地带性的隐域植被,它们不依赖于大气降水,而是靠地下水供给其蒸腾和蒸发。但地下水是通过毛细管作用而上升补给土壤水分,使土壤沿剖面由上而下含水率逐渐增加,从而被植被吸收利用(徐海量等, 2003a; 2003b)。因此,在一定意义上说,地下水是通过改变土壤含水量来影响植被的生长,所以有必要分析不同地下水位梯度下土壤含水率的变化特征。

对塔里木河下游 58 个采样点的地下水和土壤含水率的资料(由于土壤质地的差异,在此采用 Running average 的方法),在 $d = 3$ 、 $d = 4$ 和 $d = 5$ 的情况下,做出 3 条地下水位和土壤含水率的移动平均线(图 3)。

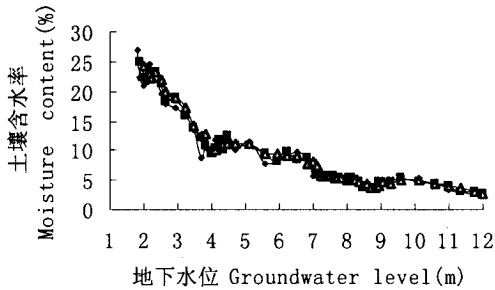


图 3 地下水位与土壤含水率关系图
Fig.3 Relationship between groundwater level and soil water content

从图 3 看,3 条移动平均线基本重叠,说明可以反映整体的变化趋势。即随着地下水位的降低,剖面平均土壤含水率呈下降趋势,但在不同区间下降的幅度有一定差别。当地下水位在 3.5 m 以上时,土壤含水率随地下水位的下降而明显下降;而当地下水位在 4.0 m 以下时,这种变化显著减弱,从图形看为一条平缓下降的曲线。这种变化趋势可以用两条趋势线来描述:当地下水位在 1 ~ 4 m 时, $Y = 64.898e^{-0.515X}$, $R^2 = 0.727$, $p < 0.01$;当地下水位在

4~12 m 时, $Y = 21.147e^{-0.178X}$, $R^2 = 0.658$, $p < 0.01$ 其中 Y 为土壤含水率(剖面平均), X 为地下水位。这与在塔里木河上中游对 30 个剖面得出的地下水位与土壤含水率的表达式 $Y = 35.73e^{-0.185X}$ 很接近(宋郁东等, 1999)。说明在土壤质地和气候条件差别不大的塔里木河流域, 地下水位对土壤含水率的影响基本是相似的。从所挖剖面的土壤质地看, 塔里木河中下游每一个土壤剖面都是以粉砂、砂壤土、轻壤土、中壤土的分层交错组合的复杂形式, 造成这种情形的原因可能与塔里木河频繁改道和风沙与流水交互作用有关。而根据以前做的土质潜水蒸发实验结果看(宋郁东等, 1999), 它们的极限蒸发深度分别是: 1.5、2.5、3.5、4.5 m。因此, 可以认为, 在塔里木河中下游地区, 地下水位对表层土壤水影响的区间在 3.5~4.0 m。这个区间的生态意义在于: 对于本区不同的区域, 当水位超过 3.5 m 时, 地下水可以通过大气蒸发和毛细管作用影响表层土壤的湿度; 当地下水位超过 4.0 m 时, 水位的变化对表层土壤含水率的影响基本消失。这一结果与张宏等(2000)在塔里木盆地北部通过盐生草甸净第一性生产力计算的本区盐化草甸植被对土壤水敏感程度的分界点 3.3 m, 以及宋郁东等(1999)通过潜水蒸腾试验得出塔里木河流域的潜水蒸发极限深度是不矛盾的。而它的确定, 对于目前正在开展的塔里木河下游生态输水工程在实施输水后科学、合理地确定输水后的合理水位具有重要的指导意义。同时, 由于草本植被生长在很大程度上取决于表层土壤含水率的高低, 故 3.5 m 也可被看作是草本植被正常生长的最低水位。

2.3 地下水位与植物水分胁迫

前面已经谈到了在不同的水位下植被变化的特点。而引起这种变化的原因可以从不同植物根系分布的深度和不同水位引起的生理胁迫程度来解释。

根据以往的研究, 当植物遭受干旱胁迫时, 许多植物可以通过渗透调节作用维持细胞一定的含水量和膨压, 以增强植物的抗旱能力和抗逆性, 或者通过对气孔运动及叶片生长速率的调节有效地减少水分消耗(Bohnert & Jensen, 1996; Blum & Ebercon, 1976)。而这种变化可以从植物体内的脯氨酸(Pro)和脱落酸(ABA)的积累量变化上得到定量的说明(图4, 图5)。为此, 我们对 Pro 和 ABA 进行了测定, 每个样地取不同部位叶片样品的混合样。考虑到胡杨作为塔里木河流域分布最广、在不同水位梯度下均出现有利条件, 本文选取胡杨叶组织的脯氨酸

(Pro)和脱落酸(ABA)的积累量来分析地下水位对胡杨生理的影响。

图4, 图5是2002年7~9月塔里木河下游主要建群种胡杨的叶片脯氨酸(Pro)和脱落酸(ABA)含量与地下水位回归分析结果。从图4看, 随着地下水位的下降胡杨叶中的ABA含量明显增加, 二者表现出明显的相关性, $R^2 = 0.8304$, $p < 0.01$ 。由此可以初步得到一个结论, 当胡杨遭受水分胁迫时, 更多的表现在脱落酸的积累上。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反应。干旱引起ABA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(Davies & Zhang, 1991)。因此, 如果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, 这很有可能是胡杨通过放弃一部分枝叶的生长来保证最低限度的水分消耗。

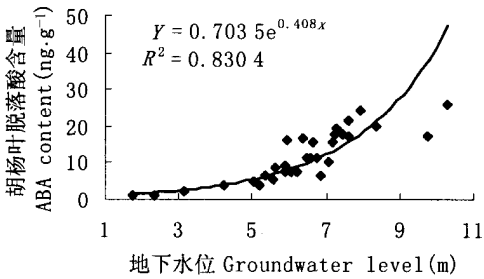


图4 不同地下水位生境中胡杨叶 ABA 含量的累积
Fig.4 ABA content of *Populus euphratica* leaf in habitats with different groundwater level

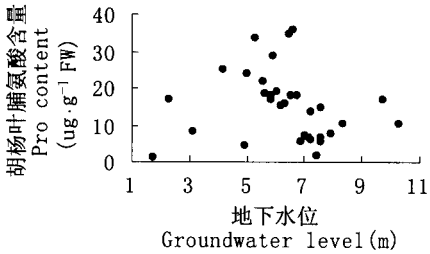


图5 不同地下水位生境中胡杨叶脯氨酸的含量
Fig.5 Pro content of *Populus euphratica* leaf in habitats with different groundwater levels

通过对图5的分析: 当地下水位在 5.0~5.5 m 这一区间时, 胡杨脯氨酸(Pro)含量的平均值为 $26.32 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$, 而在 4~5 m 和 5.5~6 m 时, 分别为 $14.62 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 和 $20.34 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$, 并且也远高于其它的区间。另外, 从图4中看出脱落酸开始明显升高的区间也在此。这使我们有理由相信地下

水位 5.0 m 很有可能就是胡杨的干旱胁迫水位。由于通过生理指标研究胡杨的水分胁迫程度在国内外均无先例,但是以通过土壤水分对胡杨生长的研究(季方等 2001)以及对不同地下水位胡杨的地表长势的调查(宋郁东等,1999)均认为 5.0 m 是胡杨林开始衰败的结论来看,说明以上的分析是符合实际的。同时,也可以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 Pro 和 ABA 含量明显增加(Bray, 1997),而后随着水分条件的继续恶化,更多地表现在 ABA 含量的累积上。

2.4 地下水位变化引起植被的变化

为了验证以上讨论的可靠性,现以塔里木河下游生态输水后,植被对地下水位变化的地表生态响应为例进行说明。为了综合整治塔里木河流域生态环境,于 2000 年 5 月在塔里木河下游实施了应急生态输水工程。整个输水过程采用了“线状”输水的方式,即主要通过河道过水,抬升沿河附近的地下水位,以实现植被的自然生态恢复。输水后,地下水位大幅升高(徐海量等 2003a; 2003b)。以距大西海子水库 20 km 的阿克墩为例,输水前两口监测井的地下水位分别是 5.50 和 6.74 m,地表植被盖度为 20% 和 12%(2000 年 5 月 14 日);输水后水位升高到 0.42 和 1.80 m,植被盖度分别是 90% 和 80%(2002 年 8 月 8 日);而群落多样性指数(Simpson 指数)则由输水前的 0.180 和 0.163 分别升高到 0.621 和 0.577。胡杨随着水位的升高表现为冠幅的增加。在阿拉干,水位由输水前的 11.47 m(2000 年 5 月 14 日)升高到 7.30 m(2002 年 8 月 31 日),冠幅由平均 4.21 m² 增加到 8.67 m²,而在英苏的 3 号观测井,地下水位从输水前的 9.87 m(2000 年 5 月 14 日)升高到 3.00 m(2002 年 9 月 12 日),井位附近的胡杨冠幅由 5 m² 增加到近 20 m²,地表也出现许多新萌发幼苗;柽柳的变化则主要反映在当年新枝长度的变化上,同样在英苏,多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)由平均新枝长(18 ± 9) cm 增加到(31 ± 11) cm(95% 置信区间)。

3 小 结

研究表明,地下水位的高低直接影响植被长势的好坏和现有植物种类的多少,但是这种影响在很大程度上是通过影响土壤含水率来实现的。当地下水位在 3.5 m 以上时,地下水可以通过蒸发和毛细管作用影响到地表土壤含水率,从而能够被草本植被利用,地表的植被盖度和植物种类也明显要高,而

当地下水位在 4 m 以下时,地下水很难影响表层土壤水,因此草本植被逐渐消失。当地下水位在 5.0 m 以下时,多数乔、灌木植被将因水分亏缺而死亡,此时植物种类日趋单一、植被盖度大幅减少,而耐旱性非常强的柽柳和胡杨开始显现长势的衰败。但是它们在水分亏缺和干旱胁迫的压力下,表现出种群结构的老龄化、更新能力的丧失。尤其是胡杨,因水分的亏缺而出现枯枝、冠幅减少现象,而生理指标则表现为脯氨酸(Pro)和脱落酸(ABA)含量的增加。由于胡杨的 Pro 和 ABA 含量在 5.0 m 这一水位出现明显的变化,因此,可以将其作为胡杨的干旱胁迫水位。

当地下水位明显升高时,植物的响应也是非常明显的。对草本植被而言,植被盖度、物种多样性均明显增加;对胡杨来说,随着水分条件的改善,长势明显转好,突出反映在冠幅的增加和新枝的萌发上;本区分布最广的柽柳随着地下水位的升高,当年新枝长度也明显增长。就塔里木河中下游这一特定区域而言,地下水位与土壤含水率的关系可以表示为:当地下水位在 1 ~ 4 m 时, $Y = 64.898e^{-0.515X}$, $R^2 = 0.727$, $p < 0.01$;当地下水位在 4 ~ 12 m 时, $Y = 21.147e^{-0.178X}$, $R^2 = 0.658$, $p < 0.01$ 。由于地下水位在 3.5 m 以上时,表层土壤水可以得到地下水的补给,从而能够为本区草本植被利用。因此,今后在本地区进行生态输水或其它生态建设时,可以将 3.5 m 作为恢复草本植被的最低生态水位。

参 考 文 献

- Blum, A. & A. Ebercon. 1976. Genotypic responses in sorghum to drought stress—free proline accumulation and drought resistance. *Crop Science*, **16**: 428 ~ 431.
- Bohnert, H. J. & R. G. Jensen. 1996. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants. *Trends in Biotechnology*, **14**: 89 ~ 95.
- Bray, E. A. 1997. Plant responses to water deficit. *Trends in Plant Science*, **2**: 48 ~ 54.
- Davies, W. J. & J. Zhang. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **42**: 55 ~ 76.
- Ji, F. (季方), Y. J. Ma (马英杰) & Z. L. Fan (樊自立). 2001. Soil water regime in *Populus euphratica* forest on the Tarim River alluvial plain. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **25**: 17 ~ 21. (in Chinese with English abstract)
- Li, X. Y. (李香云), P. T. Zhang (张蓬涛) & Y. S. Zhang (章予舒). 2001. Analysis on the features and the decline causes of the green corridor at the lower reaches of the mainstream of Tarim River. *Arid Zone Research* (干旱区研究), **18**(4): 26 ~ 31. (in Chinese with English abstract)
- Liang, K. Y. (梁匡一) & P. J. Liu (刘培君). 1990. Resource

and environment study on banks of Tarim River with RS. Beijing: Science Press. 13 ~ 16. (in Chinese)

Liu, Y.L. (刘晏良). 2000. Report on field survey of middle and lower reaches of Tarim River. Beijing: China Statistics Press. 22 ~ 23. (in Chinese)

Ruan, X. (阮晓), Q. Wang (王强), J. M. Zhu(朱江明) & C.X. Zheng(郑春霞). 2000. Changes in content or release rate of 4 plant hormones in relation to the development, ripening and senescence of fragment pear fruit. *Acta Phytophysiologica Sinica* (植物生理学报), **26**: 402 ~ 406. (in Chinese with English abstract)

Song, Y.D. (宋郁东), Z. L. Fan(樊自立) & Z. D. Lei(雷志栋). 1999. Research on water resources and ecology of Tarim River. Urumqi: Xinjiang People's Press. 201 ~ 299. (in Chinese with English abstract)

Wang, R.H. (王让会) & Z.L.Fan (樊自立). 1998. Study on land desertification with RS and GIS techniques in Algan, the lower reaches of Tarim River. *Journal of Remote Sensing* (遥感学报), **2**: 137 ~ 142. (in Chinese with English abstract)

Xu, H.L. (徐海量), Y. N. Chen(陈亚宁) & W. H. Li (李卫红). 2003a. Study on response of groundwater after ecological water transport at the lower reaches of Tarim River. *Research on Environmental Sciences* (环境科学研究), **16**(2): 21 ~ 24. (in Chinese with English abstract)

Xu, H.L. (徐海量), Y. N. Chen(陈亚宁) & W. H. Li (李卫红). 2003b. Analysis of the desertification in the lower reaches of Tarim River by multi-regression model. *Arid Zone Research* (干旱区研究), **27**(1): 36 ~ 39. (in Chinese with English abstract)

Zhang, H. (张宏) & Z. L. Fan(樊自立). 2000. Study on a *NPP* model of salinized meadow in the north of Tarim Basin. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), **24**: 13 ~ 17. (in Chinese with English abstract)

Zhu, G.L.(朱广廉). 1983. Measuration on free proline of plant body. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), (4): 1 ~ 7. (in Chinese)

责任编辑：陈伟烈 责任编辑：周玉荣