

DOI: 10.5846/stxb201110101484

鱼腾飞,冯起,刘蔚,司建华,席海洋,陈丽娟. 黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系. 生态学报 2012, 32(22): 7009–7017.
Yu T F, Feng Q, Liu W, Si J H, Xi H Y, Chen L J. Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China. Acta Ecologica Sinica 2012, 32(22): 7009–7017.

黑河下游土壤水盐对生态输水的响应 及其与植被生长的关系

鱼腾飞¹, 冯起^{1,2,*}, 刘蔚², 司建华², 席海洋², 陈丽娟²

(1. 兰州大学 西部环境与气候变化研究院, 兰州 730000;

2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 阿拉善荒漠生态水文试验研究站, 兰州 730000)

摘要: 生态输水作为一项改善黑河下游生态环境的人工输水工程, 研究土壤水盐与地表植被对输水的响应对于下游植被的恢复与重建具有重要的理论和实践意义。以 2001 年和 2010 年野外土壤和植物样方调查资料为基础, 探讨了黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系。结果表明: (1) 输水后不同深度土壤含水率的增加幅度依次为: 胡杨林>柽柳林>草地; (2) 不同群落土壤含盐量的增加幅度依次为: 苦豆子>柽柳>梭梭>胡杨; 同时, 土壤盐分主要以 HCO_3^- 和 Na^+ 为主的轻度盐化土向以 SO_4^{2-} 、 Cl^- 及 Ca^{2+} 等为主的中度和强度盐化土转化; (3) 以胡杨为例, 土壤含水率小于 6% 时, 密度和冠幅与土壤含水率呈正相关, 但大于 6% 时, 冠幅和密度分别介于 40—70 m^2 和 0.5—5 株/100 m^2 之间; 同样, 土壤水溶性盐含量小于 1% 时, 密度和冠幅与土壤含水率呈正相关, 但大于 1% 时, 密度在 0.5—5 株/100 m^2 之间, 造成上述结果的原因更多是群落的一种“自然稀疏”现象。

关键词: 生态输水; 土壤水盐; 地表植被; 响应过程; 黑河下游

Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China

YU Tengfei¹, FENG Qi^{1,2,*}, LIU Wei², SI Jianhua², XI Haiyang², CHEN Lijuan²

1 Research School of Arid Environment & Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 Alashan Desert Eco-hydrology Experimental Research Station, Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: The Heihe River is the second longest inland river in China. The eco-environmental problems of the oasis in the lower reaches of Heihe River have markedly deteriorated over the past several decades because of the comprehensive effects of a number of factors. These factors include the continuous decrease in the discharge water of the Heihe River, human and animal population growth, increase of socio-economic activities, and climate warming. Water deliveries have been conducted by the Heihe River Bureau since 2000 to address the existing eco-environmental problems. Several scientific and realistic issues concerning this significant artificial water delivery project include the response process and mechanism of the eco-environment involving vegetation restoration and reconstruction brought about by water deliveries in the lower reaches of Heihe River. The responses of soil water and salinity variation to water deliveries were presented based on the investigation of soil and plant plots in 2001 and 2010. This paper aimed to evaluate the variance in the soil moisture and soil-soluble salt

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (91025002); 国家自然科学基金面上项目 (30970492, 91025024); 国家科技支撑计划课题 (No. 2012BAC08B05); 中国科学院重点部署项目 (No. KZZD-EW-04-05)

收稿日期: 2011-10-10; 修订日期: 2012-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qifeng@lzb.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

content before and after water deliveries in the lower reaches of Heihe River. The relationship between soil moisture, as well as soil-soluble salt content, and vegetation growth variables was also determined.

The results indicated that the soil moisture content (SMC) increased at different depths after water deliveries in Heihe River. The rate of increase varied with the different types of communities and could be arranged in the following order: *Populus euphratica* > *Tamarix chinensis* > Herbal. Moreover, the soil-soluble salt content (SSC) increased after water deliveries at different depths because of the strong evaporation effects. The rate of increase could be arranged in following the order: *Sophora alopecuroides* > *T. chinensis* > *Haloxylon ammodendron* > *P. euphratica*. In addition, it could be found in the conversion of soil salinity type from slightly saline soil dominated by HCO_3^- and Na^+ to medium and intense saline soil mainly dominated by SO_4^{2-} , Cl^- and Ca^{2+} . The average density and crown, with *P. euphratica* community as an example, increased with increasing SMC of less than 6%, in which these values ranged from 40 m^2 to 70 m^2 and 0.5 plants per 100 m^2 to 5 plants per 100 m^2 at an SMC of more than 6%, respectively. Similarly, the average density ranged from 0.5 plants per 100 m^2 to 5 plants per 100 m^2 with an SSC of more than 6%. However, the average crown did not decrease with an SSC of more than 6%. Therefore, we conclude that the “self thinning” process of the *P. euphratica* community, rather than the salt, caused stress to the plant growth.

Key Words: ecological water deliveries; soil-water salinity content; response process; plant growth; lower reaches of Heihe River

干旱区内陆河流域的生态保育恢复是当前社会各界关注的热点问题^[1]。近几十年,西北内陆河流域生态环境不断恶化,尤以下游更为严峻。根本原因在于不合理的水资源利用方式引起的下游水资源短缺对生物生境的破坏,为了恢复和重建下游受损的生态系统就需要不断改善当地生境现状,主要措施之一是采用应急生态输水进入下游河道,通过河道渗漏补给地下水以维持植被的正常生长。生态输水通过大规模的水资源转移来保护和恢复严重受损的生态系统,有效的保护了下游濒临灭绝的生物资源。作为一项巨大的人工输水工程,下游生态环境对生态输水的响应过程及机理是当前备受关注的科学问题^[2-3]。在自然界,土壤、植被与环境是一个统一的有机整体,植被作为环境优劣的良好“指示剂”,其生长状况又与土壤条件息息相关,土壤水分和盐分(简称土壤水盐)动态及其与植被生长的相互作用关系成为影响局地环境变化的主要因素。因此,利用土壤水盐和植被的动态来探讨受人类活动作用而发生的环境质量和性状的变化是可行的。

黑河下游的额济纳绿洲,属西北内陆河流域极端干旱区荒漠绿洲,是保护河西走廊、西北乃至华北地区的天然“绿色走廊”。近几十年来,在全球气候暖干化、上游下泄水量逐年减少、当地人畜数量增加及社会经济活动增强等多重因素的共同作用下,额济纳绿洲生态环境急剧恶化,绿洲规模不断缩小,生态功能不断减弱,其生态环境问题倍受社会各界关注^[4-8]。2000年7月伊始,为恢复和重建受损的脆弱生态系统,国家紧急启动以增加生态用水为目的的黑河下游生态输水工程,河水于2002年10月17日注入干涸10a之久的东居延海,2003年河水又进入干涸40a之久的西居延海^[9]。通过近10年的下游应急生态输水,黑河下游水资源时空分布发生了重大变化,给下游生态环境带来积极的响应。但是,值得思考的是,由于黑河下游地区强烈的蒸散发引起土壤水分在向上运移的过程不断将土壤盐分带至表层,但稀少的降水量又不能将土壤表层的盐分淋溶排走,致使土壤表层发生“富盐化”现象,过多的土壤盐分必然危害到植物的正常生长^[10-11]。那么,如何理解生态输水实施后下游“水-土-气-生”要素的响应过程及机理成为指导生态输水工程建设的首要解决问题。

目前,对黑河下游生态输水的环境响应研究主要集中在植被与地下水变化等方面^[12-16]。已有研究表明:输水后额济纳绿洲植被退化速度得到明显的遏制,局部地区还出现好转^[12],胡杨林得到恢复,灌木得到部分恢复,禾草甸得到一定程度的恢复^[13],在消除放牧等干扰因素的影响下,工程的实施有利于胡杨的根蘖繁殖更新^[14]。不可否认,自输水工程实施以来,地下水抬升使下游植被得到一定程度的恢复,地下水与植被的正反馈关系已得到确认^[15-19]。土壤作为地下水与植被之间联系的纽带,土壤水盐动态必然与间歇性输水引

起的地下水波动密切相关^[3],而这种波动变化会对地表植被产生一定的负反馈作用,但目前对于输水后的土壤水盐动态及其植被的响应过程尚不明确。有鉴于此,本文以黑河下游为研究对象,以2001和2010年两次野外土壤调查资料为基础,结合野外植物样方调查,探讨黑河下游土壤水盐和地表植被对生态输水的响应过程,以期对未来黑河下游植被的恢复与重建提供科学依据。

1 研究区概况

黑河在正义峡以下为下游,河道长333 km,总面积约为 $5.99 \times 10^4 \text{ km}^2$,其南与甘肃省鼎新盆地相邻,西以马鬃山剥蚀山地为限,东接巴丹吉林沙漠,北抵中蒙边界。地理位置为北纬 $40^\circ 20' - 42^\circ 41'$,东经 $97^\circ 36' - 102^\circ 08'$,海拔在900—1100 m之间(图1)。该地区气候极端干旱,据额济纳气象站1957—2011年资料,年均气温为 8.77°C ,相对湿度33.9%,风速3.7 m/s,降水量为37.40 mm,蒸发皿蒸发量为3390.26 mm,约为年均降水量的90倍。研究区植物种类贫乏,隶属于49科151属268种^[20],植被类型以旱生、耐盐碱的亚洲中部荒漠乔木、灌木和草本为主,主要分布在额济纳河两岸与湖积平原地带。乔木以胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)和沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)为主;灌木以怪柳(*Tamarix chinensis* Ledeb.)、梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bge.)为主,其次为黑果枸杞(*Lycium ruthenicum* Murr.)、白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia* Shap. ex Kell. et Shap.)等;草本植物以苦豆子(*Sophora alopecuroides* L.)、芦苇(*Phragmites communis* Trin.)、芨芨草(*Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski)、骆驼蓬(*Peganum harmala* L.)等为主。该区土壤的类型较简单,属地带性灰棕漠土和石膏性灰棕漠土,天然绿洲内多为草甸土、盐化草甸土和风沙土等,局部有盐化沼泽土和沼泽盐土出现。

2 材料及方法

根据额济纳绿洲植被沿河分布的特点,土壤样本按平行和垂直于河道布设采样点,分别于2001年和2010年的9月采集,样本数分别为42个和45个,利用GPS记录的经纬度将调查样点空间化(图1)。由于2001年调查的数据主要集中于绿洲核心区,因此分析的结果主要限于图1矩形区域内。土壤含水率数据取0—100 cm深度,按20 cm间隔取5层,土壤盐分取表层0—20 cm混合样。土壤样本化学离子分析在室内进行,其中: CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 含量用双指示剂-中和滴定法测定; Cl^- 含量用硝酸汞容量法滴定; SO_4^{2-} 含量用EDTA间接滴定法测定; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量用EDTA(已二胺四乙酸二钠)方法测定; K^+ 和 Na^+ 含量用410火焰光度计法测定。土壤含水率($W, \%$)为重量含水量,采用烘干称重法测定。

结合土壤水盐调查过程,2001年样方调查乔木为胡杨,样方面积不等,最小5 m×5 m,最大50 m×50 m,分过熟、成熟、近熟、更新幼林分别调查;调查灌木主要为怪柳、黑果枸杞等,样方面积为20 m×20 m,每木检尺乔木和灌木的高度、冠幅、胸径(或地径)等指标,调查草本主要为苦豆子、芦苇、芨芨草等,每个样地重复1 m×1 m的小样方3—5个,草本植物记录其株数、高度,并按样方统计盖度、频度等。2010年调查乔木和灌木以布设样地(20 m×20 m)为基本单位,对高度>1.3 m的乔木每木检尺,记载其树种、树高度、胸径、冠幅等,对高度<1.3 m的乔木及林下灌木,记载其高度、冠幅及地径等;对于林下草本设置5个1 m×1 m的小样方,分种记载其株数、高度,并按样方统计多度、盖度等。

在此,有几点需要说明的是:(1)由于调查时间的限制,2001年的土壤水分未能监测,输水是在2000年开始的,由于土壤水分与地下水的关系非常密切,因此本文采用的输水前的土壤水分数据为1998年5个典型样地不同深度的数据^[21]。(2)对于受地下水位变化影响较明显土壤盐分而言,用2001年的数据分析输水前土壤盐分的变化存在一个真实性和代表性问题,所幸的是,虽然黑河输水从2000年开始,但由于最初下泄水量少,大部分河水在没有注入东居延海以前就已经消耗殆尽,至2002年7月17日才最终进入东居延海。因此,2001年的土壤盐分可以代表输水前与2010年进行比较。

3 结果分析

3.1 输水前后土壤水分变化

输水前后不同植被类型下的土壤含水率变化见表1。由表1可见:胡杨林80—140 cm变化最大,从1998

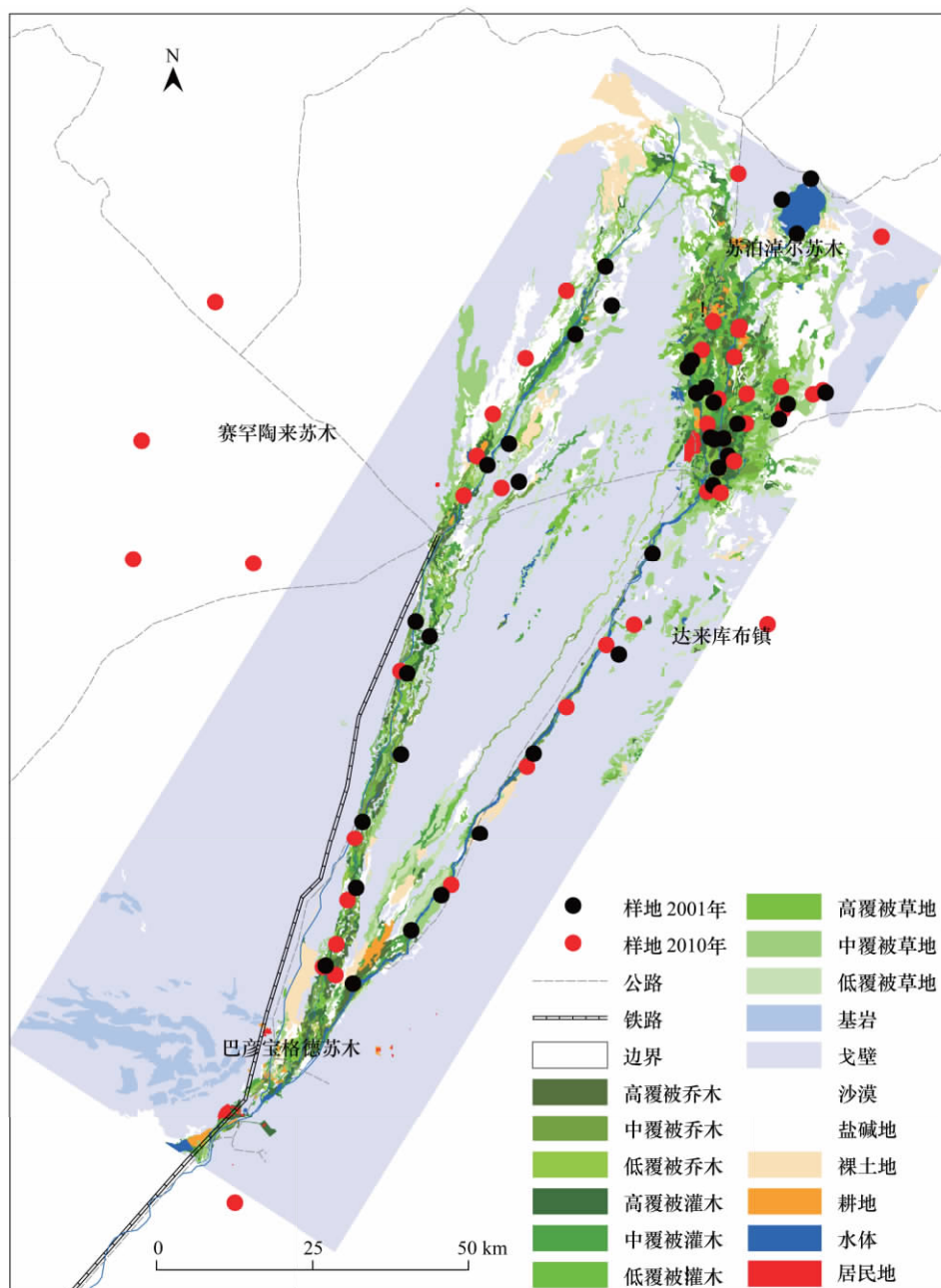


图1 调查植物样方及土壤采样点分布示意图(背景图为2008年黑河下游土地利用类型)

Fig. 1 Schematic representation of plant quadrat and soil sampling plots distribution, in which the base map was land use patterns at the lower reaches of the Heihe River in 2008

年的6%增加到2010年的17.36%,增加了约3倍。20—80 cm土壤含水率也增加了近1倍,表层0—20 cm也略有增加:从4.01%(均值)增加到4.27%,但增加的幅度较小于其他各层。由此可见:胡杨林土壤含水率表层变化不大,而随着土壤深度的增加,输水后不同深度的增加速率明显高于输水前。相比较而言,柽柳林、草地在不同深度上的土壤含水率变化整体表现为增加的趋势,增加的幅度要小于胡杨林地。而沙地土壤含水率受地形、小气候等因素影响表现出减小趋势。黑河下游土壤主要接受地下水的补给,具有明显的垂直分异性,由于不同植物的生态水文效应差异造成不同群落土壤含水率也存在显著的差异,表现为:胡杨>柽柳>草地>沙地。

土壤水分变化是降水、植物蒸腾、土壤蒸散、地表径流等一系列因素综合作用的结果^[3]。从水文过程角

度考虑,目前的间歇性输水形式使得距离河道越近,地下水接受河道补给的水量越多,反之亦然^[22]。土壤水分与地下水关系密切,其空间变化亦表现出类似特征。图2显示了随着垂直河道距离的增加土壤含水率呈递减的趋势:表层0—20 cm和20—40 cm相对比较稳定,土壤含水率分别在0.63%—6.76%和0.79%—9.64%之间;然而40—80 cm或100 cm呈不稳定变化,土壤含水率在1%—26%之间。同时,图2及图3显示:无论是输水前还是输水后不同群落下的干沙层确实存在,但不同的是输水后干沙层以下土壤含水率存在明显的增加趋势,其有效的起到了防治土壤水分无效散失的作用,这对于幼林龄植物浅根系吸水以维持自身生长具有重要的作用。

表1 输水前后不同植被类型下的土壤含水率比较 2010年数据为各采样点平均值/%

Table 1 Comparison of the soil water content for different vegetation types before and after water deliveries, the means of sampling plots was presented the data of 2010

| 土地利用类型 Land use pattern | 土壤剖面深度 Depths of soil profile | | | | | |
|------------------------------|-------------------------------|--------|---------|--------|-----------|--------|
| | 0—20cm | | 20—80cm | | 80—140 cm | |
| | 1998 年 | 2010 年 | 1998 年 | 2010 年 | 1998 年 | 2010 年 |
| 胡杨 <i>Populus euphratica</i> | 1—5 | 4.27 | 4—6 | 12.9 | 6 | 17.4 |
| 柽柳 <i>Tamarix chinensis</i> | <1 | 5.45 | 1—2 | 6.91 | 2—6 | 7.1 |
| 草地 Herbal | 1—3 | 1.54 | 1—5 | 5.75 | 约4 | 5.6 |
| 沙地 Sand | <1 | 0.5 | 2—4 | 1.27 | 3 | 0.6 |

3.2 输水前后土壤盐分变化

由表2可见,输水后不同植被类型林下土壤水溶性盐含量均有不同程度的增加。其中:以胡杨为优势种的乔木群落输水前后分别为0.961%、0.984%,增加约0.02倍,其中:以二道桥增加最大,增加速率为0.466%,其上的植被也由胡杨柽柳+苦豆子转化为胡杨+芦苇;尤其值得指出的是,以柽柳为优势种的灌木群落输水前后分别为0.504%、1.238%,增加约1.6倍,其上的群落结构发生明显演替,由以柽柳为主的多物种共生向单一种群落类型转化,植被覆盖度明显变小;以苦豆子为优势种的草本群落水溶性盐含量输水前后分别为0.114%、0.339%,增加约2倍,群落类型以苦豆子、花花柴、苏枸杞等多物种为主转化为以苦豆子为单一种的群落;以梭梭为优势种的群落由0.082%增加到0.187%,增加约1.3倍,而古日乃湖区的盐沼土由1.775%增加到5.424%,增加约2.1倍,土壤盐渍化程度非常高。2001年植被类型主要为梭梭+零星沙拐枣,在2010年调查期间梭梭已经大面积枯死,只有零星分布一些耐盐碱的沙拐枣、白刺、芦苇等半灌木及草本植物。

在土壤水溶性盐含量增加的同时,土壤化学离子增加幅度的差异造成了土壤离子化学类型的演化(表2)。输水前,既有以重碳酸盐(HCO_3^- - SO_4^{2-} - Mg^{2+})和硫酸盐(SO_4^{2-} - Cl^- - Na^+)为主要成分的胡杨林地,也有以碳酸盐(HCO_3^- - Cl^- - Na^+)或氯化物(Cl^- - SO_4^{2-} - Na^+)为主要成分的灌丛地和戈壁,反映了盐分来源的复杂性和影响因素的多样性。输水后,植被覆盖区主要以硫酸盐为主,包括 SO_4^{2-} - Cl^- - Na^+ 型和 SO_4^{2-} - HCO_3^- - Ca^{2+} 型两类,盐沼土仍以氯化物形式存在(图4)。分析可知,输水前后土壤盐分变化主要以 HCO_3^- 和 Na^+ 为主的轻度盐化土(1.0%—2.0%)向以 SO_4^{2-} - Cl^- 及 Ca^{2+} 等为主的中度盐化土(2.0%—4.0%)和强度盐化土(4.0%—6.0%)转化。对比发现,上述土壤离子类型与地下水离子类型基本一致:2001年,黑河下游水化学类型主要有 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Na^+ - Cl^- - SO_4^{2-} - Na^+ (Ca^{2+})、 HCO_3^- - Cl^- - Na^+ (Ca^{2+})、 SO_4^{2-} - Cl^- - Na^+ 和 SO_4^{2-} - Cl^- - Na^+ (Ca^{2+} - Mg^{2+})型^[23];2010年

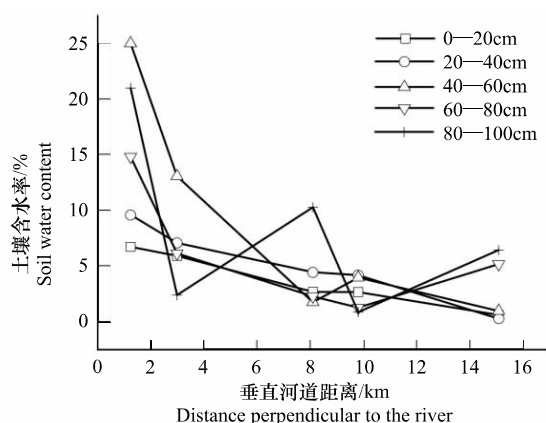


图2 垂直河流方向不同深度土壤含水率变化(2010年)
Fig. 2 Variation of soil water content under different depth perpendicular to the river (2010)

调查的地下水化学类型也主要以 $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-\text{-Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-\text{-SO}_4^{2-}\text{-Ca}^{2+}$ 和 $\text{Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}\text{-Na}^+$ 型为主。

表 2 输水前后不同植被类型下的表层(0—20cm) 土壤盐分对比

| 群落优势种 Dominant species | 土壤水溶性盐含量/% Soil-soluble salt content | | 土壤离子化学类型 Chemical type of soil ion | |
|---------------------------|---|-------|---|---|
| | 2001 | 2010 | 2001 | 2010 |
| 胡杨 | 0.961 | 0.984 | $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-\text{-Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-\text{-SO}_4^{2-}\text{-Mg}^{2+}$ | $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-\text{-Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^-\text{-Ca}^{2+}$ |
| 柽柳 | 0.504 | 1.238 | $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-\text{-Ca}^{2+}$ | $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-\text{-Na}^+$ |
| 梭梭 | 0.082 | 0.187 | $\text{HCO}_3^-\text{-Cl}^-\text{-Na}^+$ | $\text{SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^-\text{-Ca}^{2+}$ |
| 苦豆子 | 0.114 | 0.339 | $\text{HCO}_3^-\text{-SO}_4^{2-}\text{-Na}^+$ | $\text{SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^-\text{-Ca}^{2+}$ |
| 盐沼土 | 1.775 | 5.424 | $\text{Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}\text{-Na}^+$ | $\text{Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}\text{-Na}^+$ |

3.3 土壤含水量与植被生长关系

荒漠植物生理生态特征与土壤含水率的变化密切相关^[19]。以 2010 年调查的胡杨群落为例,土壤含水率在 6% 以下时的,胡杨群落的密度随土壤含水率的升高呈增加的趋势,尤其是在土壤含水率低于 1% 时,其密度仅为 1.3 株/100m²,在土壤含水率大于 6% 时,植物水分供应充足条件下,植被理应生长良好,但结果却是密度小于 5 株/100m²,而冠幅基本维持在 40—70 m² 之间(图 4)。这一结果可用植物生长的“自然稀疏”过程^[24]加以解释,即在土壤含水率超过 6%,限制植物生长的关键生态因子不再是水分状况,而是对光照和温度的竞争,表现为冠幅先增加后稳定,密度先增后减,然后趋于稳定。结果表明:黑河输水使得下游植被得到一定程度的恢复,但高大的乔木在水分限制得到缓解之后,必然通过不断增加冠幅扩展生态位以获得更多的光照资源,这对于林下植物的生长是非常不利的。

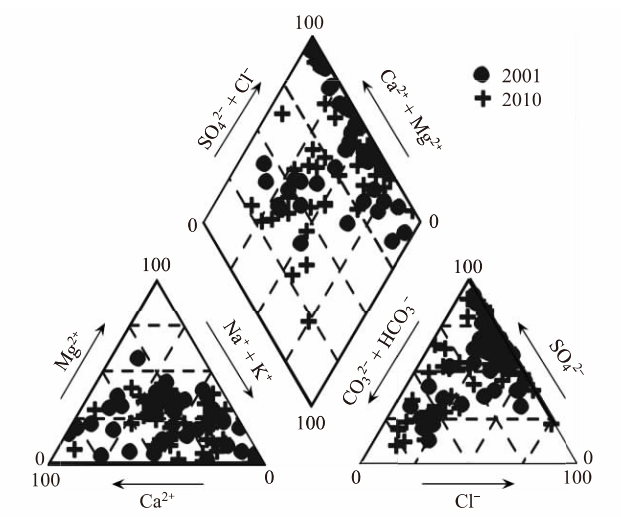


图 3 输水前后土壤离子化学类型的变化
Fig. 3 Variation of chemical type of soil ion before and after water deliveries

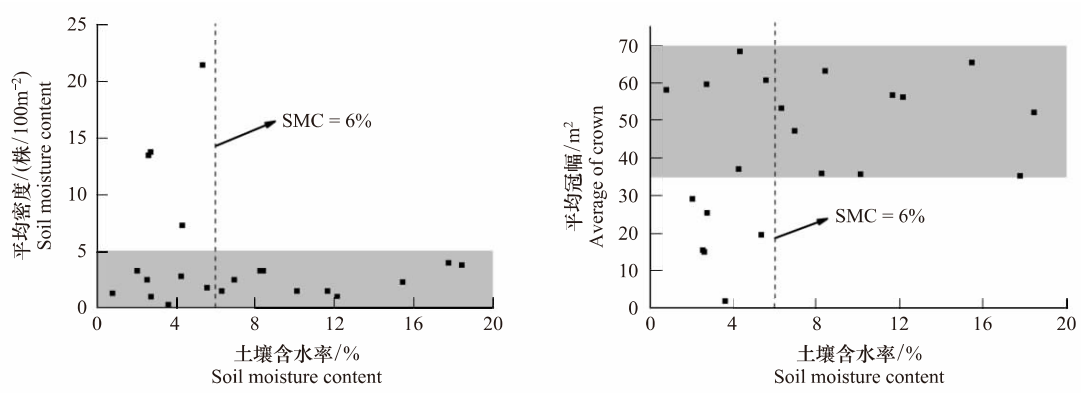


图 4 胡杨群落土壤含水率与密度及冠幅的关系
Fig. 4 Relationships between the soil water content and average of density and crown for *Populus euphratica* Oliv. community

3.4 土壤含盐量与植被生长关系

同样,以 2010 年调查的胡杨群落为例,在土壤水溶性盐含量小于 1% 时,胡杨群落的密度随水溶性盐含量的增加呈减少的趋势,尤其是当水溶性盐含量不足 0.5% 基本不存在盐分胁迫,在水溶性盐含量大于 1%

时,群落密度在 0.5—5 株/100m²(图 5)。值得注意的是:胡杨群落平均冠幅随着土壤水溶性盐含量的增加呈复杂的趋势(图 5)。与土壤水分对植被生长的作用不同的是,土壤盐分在增加到一定程度后对胡杨冠幅的影响并未出现明显的减小趋势,而对胡杨的密度增加却表现明显,可以认为是群落的“自然稀疏”现象,而非土壤盐分对植物生长的胁迫作用。

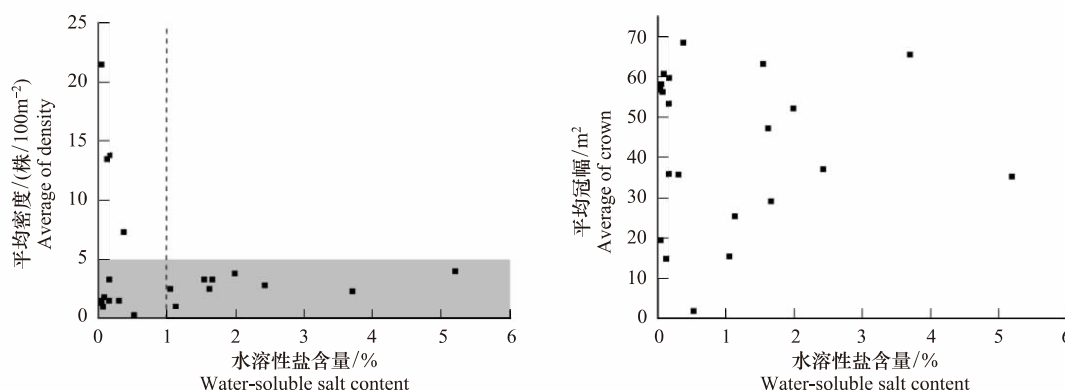


图 5 胡杨群落土壤水溶性盐含量与密度及冠幅的关系

Fig. 5 Relationships between the soil-soluble salt content and average of density and crown for *Populus euphratica* Oliv. community

4 结论与探讨

4.1 输水后土壤水分变化

土壤含水率具有明显的垂直和水平分异性,且不同群落类型之间存在差异。输水后不同深度土壤含水率变化整体呈增加的趋势,然柽柳林和草地增加的幅度要小于胡杨林。40 cm 以上土壤含水率变化相对稳定,以下均表现为相对不稳定,尤其在 40—80 cm 或 100 cm 的草本、灌木植被根系范围内,间歇性输水造成的这种不稳定变化对于植物生长具有不利影响。例如,一次灌水后草本植物迅速生长,与胡杨幼苗之间形成明显的水分竞争关系,从而限制了其繁殖和生长,这对于下游植被恢复具有较大的不利影响。这可以从当前黑河下游现有林中成、过熟林比例高达 78% 以上,疏、残林面积不断扩大,林相残败^[25]等得到佐证。

4.2 输水后土壤盐分变化

植物对于长期生长的土壤会产生一定的适应特性,不同的植被类型下土壤含盐量存在一定的差异,而输水引起的地下水波动进一步加剧了这种差异。不同植物群落水溶性盐含量输水前后均表现为不同程度的增加:胡杨群落增加约 0.02 倍;柽柳群落增加约 1.6 倍;草本群落增加约 2 倍;梭梭群落增加 0.105%,更为严重的是古日乃湖区的盐沼土由 1.775% 增加到 5.424%,增加了约 2.1 倍,表层土壤盐渍化程度非常高。同时,输水后土壤盐分类型从以 HCO₃⁻ 和 Na⁺ 为主的轻度盐化土(1.0%—2.0%)向以 SO₄²⁻、Cl⁻ 及 Ca²⁺ 等为主的中度盐化土(2.0%—4.0%)和强度盐化土(4.0%—6.0%)转化。土壤水溶性盐含量受地下水影响,土壤离子与地下水离子的类型基本一致。由于强烈的蒸发作用使得输水后地下水抬升将大量盐分运移到土壤表面,造成了弱耐盐性植物的大面积死亡,而作为世界百大入侵种的多枝柽柳耐盐碱和耐干旱的特性,使得其能够在强土壤盐渍化环境下大量生长,同时由于其自身的泌盐特性,使得其林下土壤含盐量明显高于胡杨群落,同时群落的物种多样性明显较低^[25]。因此,物种入侵造成的生物多样性锐减应引起人们的关注。

4.3 土壤水盐含量与植被生长关系

以胡杨群落为例,其平均密度和冠幅在土壤含水率为 6% 前后表现为不同的变化趋势:土壤含水率小于 6%,胡杨群落的密度和冠幅与土壤含水率呈正相关;大于 6%,冠幅基本维持 40—70 m² 之间,而密度呈先减小后稳定的趋势。同时,土壤含盐量与植物生长的关系也存在差异:土壤水溶性盐含量小于 1%,平均密度随土壤水溶性盐的增加而减小;大于 1%,平均密度在 0.5—5 株/100m² 之间,而冠幅却表现为相反的变化趋势。因此,笔者认为这是一种群落的“自然稀疏”现象,而不是土壤对植物生长的盐分胁迫。进一步说明植被在土

壤含水量高、盐分含量低时生长较好;反之生长较差,甚至不能存活^[26]。例如,在调查的西河东岸 2 km 处的一块样地中,胡杨生长良好,平均冠幅达 63.27 m²,而林下除了苦豆子外,无灌木存在,其物种多样性水平很低。可见,黑河输水虽然在一定程度上使得下游植被规模得到恢复,但是否有利于群落稳定性乃至物种多样性的保护还有待深入探讨。

References:

- [1] Call C A, Roundy B A. Perspectives and processes in revegetation of arid and semiarid rangelands. *Journal of Range Management*, 1991, 44(6): 543–549.
- [2] Chen Y N, Chen Y P, Xu C C, Ye Z X, Li Z Q, Zhu C G, Ma X D. Effects of ecological water conveyance on groundwater dynamics and riparian vegetation in the lower reaches of Tarim River, China. *Hydrological Process*, 2010, 24(2): 170–177.
- [3] Chen Y N, Li W H, Chen Y P, Xu C C, Zhang L H. Water conveyance in dried-up riverway and ecological restoration in the lower reaches of Tarim River, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 538–545.
- [4] The Department of Geography in CAS. The investigation reporting on water resource in northwest arid region: a suggest about reasonable use of water and save ecological problems for Heihe River and Shiyang River. *Advance in Earth Sciences*, 1996, 11(1): 1–4.
- [5] The department of geography in CAS. Urgency suggestion about Ejina oasis retrieval. *Advance in Earth Sciences*, 1996, 11(1): 5–6.
- [6] Feng Q, Cheng G D. Current situation, problems and rational utilization of water resources in arid north-western China. *Journal of Arid Environments*, 1998, 40(4): 373–382.
- [7] Jin X M, Hu G C, Li W M. Hysteresis effect of runoff of the Heihe River on vegetation cover in the Ejina Oasis in Northwestern of China. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 198–203.
- [8] Zhu Y H, Wu Y Q, Drake S. A survey: obstacles and strategies for the development of ground-water resources in arid inland river basins of Western China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59(2): 351–367.
- [9] Elmaloglou S, Diamantopoulos E. The effect of intermittent water application by surface point sources on the soil moisture dynamics and on deep percolation under the root zone. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 62(2): 266–275.
- [10] Zhang F S. *Environmental Stress and Plant Nutrition*. Beijing: China Agricultural University Press, 1993.
- [11] Zhu J K. Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(2): 66–71.
- [12] Guo Q L, Yang Y S, Chen Z H. Remote sensing monitoring vegetation cover change in Ejina oasis after Heihe River water was distributed. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2010, 21(5): 65–71.
- [13] Si J H, Feng Q, Zhang X Y, Su Y H, Zhang Y W. Vegetation changes in the lower reaches of the Heihe River after its water import. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(4): 631–640.
- [14] Zhao W Z, Chang X L, Li Q Y. Artificial water diversion effects of Heihe River on *Populus euphratica* Oliv. desert riparian forests in Ejina. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1987–1993.
- [15] Wei Z, Jin H J, Nan Y C, Yang S Z, Wu J K, Wang S Z. The effect on water environment in middle and downstream area of Heihe River after water allocation. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(5): 34–37.
- [16] Xi H Y, Feng Q, Si J H, Chang Z Q, Cao S K. Impacts of river recharge on groundwater level and hydrochemistry in the lower reaches of Heihe River watershed, northwestern China. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(3): 791–801.
- [17] Jiang X H, Liu C M. The influence of water regulation on vegetation in the lower Heihe River. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 20(5): 701–711.
- [18] Su Y H, Feng Q, Lü S H, Zhang Y W, Si J H. The degradation of ecological environment in Ejinaqi and its cause analysis. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(2): 264–270.
- [19] Jan K A, Rich K, Boyd K. *Salinity and plant tolerance*. Utah State University, 1997.
- [20] Zhang Y L. The geological study on the plant flora in Ejina county of Inner Mongolian. *Arid Zone Research*, 1997, 14(3): 23–32.
- [21] Feng Q, Si J H, Xi H Y. *Hydrothermal Process and Ecological Recovery Technology in the Desert Oasis*. Beijing: Science Press, 2009: 91–92.
- [22] Chen Y J, Chen Y N, Li W H, Liu J Z, Huang H. Influence of intermittent water deliveries on the hydrochemistry of soil in the lower Tarim River. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(9): 970–980.
- [23] Liu W, Wang Z J, Xi H Y. Variations of physical and chemical properties of water and soil and their significance to ecosystem in the lower reaches of Heihe River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(4): 688–694.
- [24] Chang Z F, Han F G, Zhong S N, Zhang Y C, He F G, Chai C W. Self thinning process of *Haloxylon ammodendron* planted forest in desert area of Minqin. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(1): 147–154.

- [25] Yu T F, Feng Q, Si J H, Xi H Y. Community characteristics and species diversity of Ejina oasis in the lower reaches of the Heihe River. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, 31(5): 1032-1038.
- [26] Wei D S, Zhang Q L, Wang L M, Wu D J. Sustainable business strategy of *Populus euphratica* forest in Ejina area. *Inner Mongolia Science Technology and Economy*, 2003, (5): 26-28.
- [27] Li Z J, Ni H, Tang M L, Zhou A G. Analysis on the correlation between distribution of water-salinity-organic material-bearing in soil and growth of vegetation along the lower reaches area of Heihe River. *Resource Survey and Environment*, 2003, 24(2): 143-150.

参考文献:

- [3] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 徐长春, 张丽华. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复. *生态学报*, 2007, 27(2): 538-545.
- [4] 中国科学院地学部. 西北干旱区水资源考察报告——关于黑河、石羊河流域合理用水和拯救生态问题的建议. *地球科学进展*, 1996, 11(1): 1-4.
- [5] 中国科学院地学部. 关于拯救额济纳绿洲的紧急建议. *地球科学进展*, 1996, 11(1): 5-6.
- [10] 张福锁. 环境胁迫与植物营养. 北京: 北京农业大学出版社, 1993.
- [12] 郭巧林, 杨云松, 陈志辉. 黑河分水后额济纳绿洲天然植被覆盖变化遥感监测. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(5): 65-71.
- [13] 司建华, 冯起, 张小由, 苏永红, 张艳武. 黑河下游分水后的植被变化初步研究. *西北植物学报*, 2005, 25(4): 631-640.
- [14] 赵文智, 常学礼, 李秋艳. 人工调水对额济纳胡杨荒漠河岸林繁殖的影响. *生态学报*, 2005, 25(8): 1987-1993.
- [15] 魏智, 金会军, 南永超, 杨思中, 吴锦奎, 王树洲. 黑河分水对中游水环境的影响. *灌溉排水学报*, 2007, 26(5): 34-37.
- [18] 苏永红, 冯起, 吕世华, 张艳武, 司建华. 额济纳生态环境退化及成因分析. *高原气象*, 2004, 23(2): 264-270.
- [20] 张镜铨. 内蒙古额济纳旗植物区系地理研究. *干旱区研究*, 1997, 14(3): 23-32.
- [21] 冯起, 司建华, 席海洋. 荒漠绿洲水热过程与生态恢复技术. 北京: 科学出版社, 2009.
- [22] 陈永金, 陈亚宁, 李卫红, 刘加珍, 黄辉. 塔里木河下游间歇性输水对土壤水化学的影响. *地理学报*, 2007, 62(9): 970-980.
- [23] 刘蔚, 王忠静, 席海洋. 黑河下游水土理化性质变化及生态环境意义. *冰川冻土*, 2008, 30(4): 688-694.
- [24] 常兆丰, 韩福贵, 仲生年, 张应昌, 何芳兰, 柴成武. 民勤沙区人工梭梭林自然稀疏过程研究. *西北植物学报*, 2008, 28(1): 147-154.
- [25] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 席海洋. 黑河下游额济纳绿洲植物群落特征与物种多样性研究. *西北植物学报*, 2011, 31(5): 1032-1038.
- [26] 韦东山, 张秋良, 王立明, 乌多佳. 额济纳地区胡杨林可持续经营策略. *内蒙古科技与经济*, 2003, (5): 26-28.
- [27] 李志建, 倪恒, 汤梦玲, 周爱国. 黑河下游地区土壤水盐及有机质空间分布与植被分布及长势分析. *资源调查与环境*, 2003, 24(2): 143-150.